

CARLOS JARDIM SENA

CONTROLE DINÂMICO DO NÍVEL DE TENSÃO DE FORNECIMENTO  
E DO EQUILÍBRIO DE CARREGAMENTO ENTRE FASES  
EM UM SISTEMA DE MÉDIA TENSÃO – 15 kV

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Costa D. Sousa.

VITÓRIA  
2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

S474c Sena, Carlos Jardim, 1973-  
Controle dinâmico do nível de tensão de fornecimento e do equilíbrio de carregamento entre fases em um sistema de distribuição de média tensão, 15 kV / Carlos Jardim Sena. – 2008.  
104 f. : il.

Orientador: Gilberto Costa Drumond Sousa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Reguladores de voltagem. I. Sousa, Gilberto Costa Drumond. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

---

**CARLOS JARDIM SENA**

**CONTROLE DINÂMICO DO NÍVEL DE TENSÃO DE FORNECIMENTO  
E DO EQUILÍBRIO DE CARREGAMENTO ENTRE FASES  
EM UM SISTEMA DE MÉDIA TENSÃO – 15 KV**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 27 de junho de 2008.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva**  
**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais -**  
**CEFET/MG**

## DEDICATÓRIA

Às minhas filhas Cecília e Helena e, sobretudo, à minha esposa Vanessa que se viram privadas de nossos momentos de lazer durante o período de pesquisa e desenvolvimento da presente dissertação, sacrificando seus próprios interesses em prol desse objetivo.

Aos meus pais que sempre incentivaram a busca do conhecimento como forma de aperfeiçoamento e superação em um mundo competitivo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à paciência e orientação do Prof. Gilberto no transcurso deste trabalho, mantendo-me concentrado e motivado no objetivo principal, bem como a colaboração dos colegas e demais professores integrantes do programa de mestrado em Controle e Automação da UFES na disponibilização de programas, artigos e materiais para o aprofundamento do estudo.

Agradeço o incentivo recebido dos colegas e do corpo gerencial da ESCELSA, sobretudo do Sr. Renato A. Lima, na liberalidade concedida para o cumprimento de minha jornada semanal de trabalho, sem o quê não teria sido viável o desenvolvimento deste trabalho.

# ÍNDICE:

LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS.....	12
RESUMO: .....	14
ABSTRACT .....	14
CAPÍTULO I INTRODUÇÃO.....	15
1.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	18
1.2. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO .....	19
1.3. VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO - VTCD.....	19
1.4. CENÁRIO DA ANÁLISE.....	20
1.5. CONCLUSÕES .....	21
CAPÍTULO II TECNOLOGIAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO .....	23
2.1. BANCOS DE CAPACITORES.....	23
2.2. BANCOS REGULADORES DE TENSÃO .....	24
2.3. A REGULAÇÃO DA TENSÃO PELA COMPENSAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA.....	27
2.3.1. O COMPENSADOR SÍNCRONO ROTATIVO.....	27
2.3.2. O COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS – SVC .....	28
2.3.3. O COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO – STATCOM.....	29
2.4. CONCLUSÕES .....	37
CAPÍTULO III MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA UTILIZANDO O MATLAB SIMPOWER SYSTEMS .....	39
3.1. REDE DE DISTRIBUIÇÃO 13,8 KV .....	39
3.2. BANCOS DE CAPACITORES.....	39
3.3. BANCO REGULADOR DE TENSÃO.....	39
3.3.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO REGULADOR DE TENSÃO .....	41
3.4. COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS - STATCOM.....	41
3.4.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS INSTANTÂNEAS.....	42
3.4.2. A TRANSFORMAÇÃO PARA O EIXO DE REFERÊNCIA SÍNCRONO EM CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO.....	43
3.4.3. O CONTROLADOR DAS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO.....	44
3.4.4. O CONTROLADOR DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA.....	51
3.5. CONCLUSÕES .....	55
CAPÍTULO IV ESTUDO DE SIMULAÇÃO .....	56
4.1. 1º CENÁRIO BASE: SUBTENSÃO SUSTENTADA EM SISTEMA TRIFÁSICO EQUILIBRADO SEM COMPENSAÇÃO.....	58
4.1.1. CENÁRIO A: APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO.....	59

4.1.2. CENÁRIO B: O STATCOM X AS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO.....	61
4.1.3. CENÁRIO C: O STATCOM ASSOCIADO ÀS DEMAIS TÉCNICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO.....	64
4.2. 2º CENÁRIO BASE: SUBTENSÃO SUSTENTADA EM SISTEMA TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO SEM MITIGAÇÃO.....	65
4.2.1. CENÁRIO A: APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO.....	66
4.2.2. CENÁRIO B: O STATCOM X O REGULADOR DE TENSÃO.....	69
4.2.3. CENÁRIO C: O STATCOM ASSOCIADO ÀS DEMAIS TÉCNICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO.....	72
4.3. 3º CENÁRIO BASE: ANÁLISE DINÂMICA DE SISTEMA TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO COM CHAVEAMENTO DE CARGA TRIFÁSICA DESEQUILIBRADA .....	74
4.3.1. CENÁRIO A: APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO.....	74
4.3.2. CENÁRIO B: O STATCOM X O REGULADOR DE TENSÃO.....	77
4.3.3. CENÁRIO C: O STATCOM ASSOCIADO ÀS DEMAIS TÉCNICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO.....	81
4.3.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS.....	86
4.4. CONCLUSÕES.....	86
CAPÍTULO V CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	91
APÊNDICE A	
TRANSFORMAÇÃO PARA O EIXO DE REFERÊNCIA SÍNCRONO EM CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO.....	93
ANEXO A	
S-FUNCTIONS DO CONTROLE DO STATCOM.....	97
ANEXO B	
MÓDULOS DO SIMULINK .....	100

# LISTA DE TABELAS

Tabela I.1: Pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV [ 2 ].	18
Tabela I.2: Classificação das variações de tensão de curta duração [ 3 ].	20
Tabela III.1: Parâmetros do estágio de potência do conjunto inversor-carga.	46
Tabela IV.1: Detalhamento dos cenários simulados.	57
Tabela IV.2: Tempos de habilitação dos equipamentos.	57
Tabela IV.3: Valores eficazes da tensão e corrente de fase da rede no PCC.	75
Tabela IV.4: Valores eficazes da tensão e corrente de fase da rede no PCC.	78
Tabela IV.5: Valores eficazes da tensão e corrente de fase da rede no PCC.	81
Tabela IV.6: Valores eficazes das tensões no PCC, no instante 300 ms, considerando a utilização de um STATCOM de 0,6 MVar e de 1,2 MVar.	86
Tabela IV.7: Valores eficazes das correntes no PCC, no instante 300 ms, considerando a utilização de um STATCOM de 0,6 MVar e de 1,2 MVar.	86



# LISTA DE FIGURAS

Fig. I.1:	Faixas de tensão de atendimento em relação à tensão de referência.....	18
Fig. I.2:	Diagrama unifilar da rede de distribuição de 13,8 kV.....	21
Fig. II.1:	Modelo simplificado do regulador de tensão monofásico.....	26
Fig. II.2:	Circuito de distribuição com um SVC na barra de carga.....	29
Fig. II.3:	Diagrama simplificado de duas fontes de tensão conectadas por uma reatância $X_L$ .....	30
Fig. II.4:	Diagramas fasoriais das tensões e correntes do sistema elétrico e do STATCOM.....	31
Fig. II.5:	Sistema elétrico simplificado com STATCOM.....	31
Fig. II.6:	Diagrama fasorial do sistema simplificado sem o STATCOM.....	32
Fig. II.7:	Diagrama fasorial das tensões e correntes do sistema elétrico com o STATCOM.....	32
Fig. II.8:	Valores de correntes ativa e reativa para cada curva de $V_{pcc}$ constante, para uma tensão na fonte invariável.....	33
Fig. II.9:	Valores de corrente ativa e $V_{pcc}$ para cada curva de $I_{reativo}$ constante, para uma tensão da fonte invariável.....	34
Fig. II.10:	Valores de corrente reativa e $V_{pcc}$ para cada reta de $I_{ativo}$ constante, para uma tensão da fonte invariável.....	34
Fig. II.11:	Relação da corrente ativa e tensão na fonte para diferentes valores de $V_{pcc}$ , para uma corrente ativa da carga invariável.....	35
Fig. II.12:	Valores de corrente reativa e da tensão $V_{pcc}$ para cada reta $V_{fonte}$ constante, para uma corrente ativa da carga invariável.....	35
Fig. III.1:	Modelo de simulação do regulador de tensão.....	40
Fig. III.2:	Compensador “Shunt” de Energia Reativa.....	42
Fig. III.3:	Transformação para o eixo de referência síncrono e filtragem por fase.....	44
Fig. III.4:	Regulador da tensão do STATCOM utilizando malhas de controle separadas para as componentes de sequência positiva, negativa e zero.....	45
Fig. III.5:	Modelo do inversor e malha de controle do elo CC no ambiente MatLab/Simulink.....	45
Fig. III.6:	Circuito equivalente para a restauração e regulação da tensão.....	46
Fig. III.7:	Diagrama de pólos e zeros para o estágio de potência do STATCOM.....	47
Fig. III.8:	Resposta em frequência para o estágio de potência do STATCOM.....	47
Fig. III.9:	Diagrama de pólos e zeros da função de transferência do filtro LPN.....	48
Fig. III.10:	Resposta em frequência da função de transferência do filtro LPN.....	49
Fig. III.11:	Tipo da malha de controle simulada.....	49
Fig. III.12:	Diagrama de pólos e zeros e resposta em frequência para as funções de transferência da planta e do filtro LPN combinadas.....	50
Fig. III.13:	Resposta em frequência da malha de controle resultante.....	50
Fig. III.14:	Resposta no tempo ao degrau unitário em malha fechada.....	51
Fig. III.15:	Malha de controle do elo de corrente contínua do inversor.....	51
Fig. III.16:	Malha de controle simplificada para o elo de corrente contínua do inversor.....	52
Fig. III.17:	Parâmetros do STATCOM.....	53

Fig. III.18: Resposta em frequência da malha de controle da tensão do elo de corrente contínua do STATCOM.....	54
Fig. III.19: Resposta no tempo da malha de controle do elo CC do STATCOM a uma perturbação em degrau unitário.....	55
Fig. IV.1: Valor eficaz e instantâneo da tensão fase-neutro e corrente de fase fornecidas pela rede no PCC.....	58
Fig. IV.2: Valores eficazes da tensão fase-neutro e da corrente na fase A.....	59
Fig. IV.3: Valores eficazes das grandezas elétricas do Regulador de Tensão – Fase A.....	60
Fig. IV.4: Valor eficaz das tensões fase-neutro e das correntes de fase A, B e C no PCC.....	62
Fig. IV.5: Valores eficazes das correntes A, B e C no PCC.....	62
Fig. IV.6: Malha de controle da componente de sequência positiva.....	63
Fig. IV.7: Malha de Controle do Elo CC.....	63
Fig. IV.8: Valor eficaz das tensões fase-neutro e das correntes A, B e C da rede no PCC.....	64
Fig. IV.9: Valor eficaz das tensões e correntes de fase.....	65
Fig. IV.10: Tensões fase-neutro e Correntes de fase desequilibradas no PCC.....	66
Fig. IV.11: Valores eficazes das tensões e correntes de fase desequilibradas da rede no PCC.....	67
Fig. IV.12: Valores eficazes das tensões nos terminais de entrada e saída do RT.....	67
Fig. IV.13: Valores eficazes das correntes de fase nos terminais primário e secundário do RT.....	68
Fig. IV.14: Parâmetros do Regulador de Tensão – Valores Eficazes.....	68
Fig. IV.15: Valores eficazes das tensões e correntes no PCC.....	69
Fig. IV.16: Malha de controle da componente de sequência positiva.....	70
Fig. IV.17: Malha de controle da componente de sequência negativa.....	71
Fig. IV.18: Malha de controle da componente de sequência zero.....	71
Fig. IV.19: Valores eficazes das tensões e correntes de fase da rede no PCC.....	72
Fig. IV.20: Valores eficazes das tensões de fase nos terminais do RT.....	73
Fig. IV.21: Valores eficazes das correntes de fase nos terminais do RT.....	73
Fig. IV.22: Valores eficazes das tensões e correntes de fase no PCC.....	75
Fig. IV.23: Parâmetros do regulador de tensão.....	76
Fig. IV.24: Valores eficazes das tensões de fase nos terminais do RT.....	76
Fig. IV.25: Valores eficazes das correntes de fase nos enrolamentos do RT.....	77
Fig. IV.26: Valores eficazes das tensões e correntes de fase da rede no PCC.....	79
Fig. IV.27: Interação do STATCOM com a rede e a carga.....	79
Fig. IV.28: Sinais das malhas de controle das componentes de sequência.....	80
Fig. IV.29: Resultados para STATCOM de 1200 kVar.....	80
Fig. IV.30: Valores eficazes das tensões e correntes de fase no PCC.....	82
Fig. IV.31: Valor eficaz da corrente da fase A no PCC.....	82
Fig. IV.32: Valores eficazes das correntes de fase nos enrolamentos do RT.....	83
Fig. IV.33: Sinais das malhas de controle das componentes de sequência.....	83
Fig. IV.34: Parâmetros do Regulador de Tensão.....	84

Fig. IV.35: Valores eficazes das tensões de fase nos terminais do RT.....	84
Fig. IV.36: Comparativo dos valores eficazes das tensões e correntes de fase no PCC em cada cenário.....	85
Fig. A.1: Diagrama de blocos da transformação das componentes de sequência no eixo de referência síncrono.....	93
Fig. A.2: Eixos qd em rotação síncrona.....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta tensão – tensões de subtransmissão e de transmissão iguais ou superiores a 69 kV
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
BC	Banco Trifásico de Capacitores – 600 kVAr Automático
DVR	Restaurador Dinâmico de Tensão (Dynamic Voltage Restorer)
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
ETT	Elevação Temporária de Tensão
$I_{ativo}$	Corrente ativa requerida pela carga.
$I_{liq}$	Corrente reativa líquida do conjunto “STATCOM + carga”.
IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
$I_{reativo}$	Corrente reativa requerida pela carga.
$I_{st}$	Corrente fornecida pelo STATCOM ao sistema.
ITT	Interrupção Temporária de Tensão
MT	Média tensão – tensões de distribuição iguais ou inferiores a 34,5 kV
PCC	Ponto de Conexão da Carga
rms	Root mean square
RT	Banco Regulador de Tensão
SD	Subestação Abaixadora para Distribuição de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
STATCOM	Compensador Estático Síncrono (Static Synchronous Compensator)
SVC	Compensador Estático de Potência Reativa (Static VAr Compensator)

TA	Tensão de Atendimento
TC	Tensão contratada pela unidade consumidora no PCC
TCR	Reator Controlado por Tiristores (Thyristor-Controlled Reactor)
TL	Tensão de leitura
$T_R$	Tensão de Referência
$V$	Valor eficaz da componente de seqüência negativa da tensão
$V^+$	Valor eficaz da componente de seqüência positiva da tensão
$V_{dc}$	Tensão da barra de corrente contínua do STATCOM
$V_{fonte}$	Tensão fornecida pela fonte.
$V_{pcc}$	Tensão no ponto de conexão da carga.
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
$V_{Xs.Iativo}$	Queda de tensão na reatância série proporcionada pela corrente ativa da carga
$V_{Xs.Ireativo}$	Queda de tensão na reatância série proporcionada pela corrente reativa da carga
$V_{Xs.Ist}$	Queda de tensão na reatância série proporcionada pela corrente fornecida pelo STATCOM
$X_s$	Reatância série entre a fonte e a carga.
$X_{st}$	Reatância de acoplamento do STATCOM ao PCC.
$\Delta_{ADINF}$	Variação inferior admissível, em relação à $T_R$ , para a faixa adequada de tensão
$\Delta_{ADSUP}$	Variação superior admissível, em relação à $T_R$ , para a faixa adequada de tensão
$\Delta_{PRINF}$	Variação inferior admissível, em relação à $\Delta_{ADINF}$ , para a faixa precária de tensão
$\Delta_{PRSUP}$	Variação superior admissível, em relação à $\Delta_{ADSUP}$ , para a faixa precária de tensão
$\Delta V$	Variação da Tensão

## RESUMO:

O presente estudo apresenta uma análise da possibilidade de utilização de compensadores estáticos de reativos – STATCOMs em substituição e em complementação aos equipamentos clássicos de regulação e reequilíbrio da tensão de fornecimento, apresentando as características de cada alternativa, suas vantagens e desvantagens, considerando, no bojo da análise, parâmetros obtidos de um circuito real de distribuição em média tensão – 13,8 kV. Ao contrário dos trabalhos até então desenvolvidos, as análises ora apresentadas são realizadas sob a ótica de uma concessionária de distribuição de energia elétrica e em termos do seu planejamento de investimento, alternativas técnicas disponíveis e possibilidades de mitigação, postergação ou eliminação de determinado investimento, de sorte a compatibilizá-lo ao princípio legal vigente do investimento prudente e necessário para fins da obtenção da desejada modicidade tarifária.

## ABSTRACT

This work presents an analysis of the potential utilization of a static compensator (STATCOM) as a substitute or a complementary alternative to the classical voltage regulation and balancing techniques, high-lighting each alternative characteristics, advantages and disadvantages, considering the parameters of an actual 13,8 kV distribution circuit. These studies were performed focusing on an utility company investment alternatives among the technical solutions available to mitigate, avoid or postpone expenses, in order to cope with the prudent and necessary investment legal principle to reach a lower energy tariff.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A cada ano que passa, novos dispositivos eletroeletrônicos são criados e incorporados aos lares, escritórios e indústrias, com as mais diversas funções e para as mais diversas finalidades. Tais equipamentos, dotados das mais recentes tecnologias, trazem como característica construtiva intrínseca uma alta sensibilidade às variações de tensão, seja em regime transitório ou permanente, exigindo, portanto, um alto nível de desempenho dos sistemas aos quais estão conectados. Por outro lado, as concessionárias de distribuição, dentro de um ambiente regulado, porém privatizado, estão cada vez mais empenhadas na otimização de seus investimentos, seja com o intuito de adicionar valor para seu acionista, seja porque a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, órgão regulador do setor, não o remunerará se for dispensável ou inadequado, sob a ótica da modicidade tarifária em que trabalha. Dessa forma, a preocupação com as perdas elétricas no sistema de distribuição, as quais, diga-se de passagem, são apenas parcialmente reconhecidas na tarifa, bem como com a devida alocação dos recursos necessários à sua expansão e à manutenção dos limites mínimos legais de conformidade e continuidade do fornecimento, é crescente junto a essas empresas que vêm no tratamento destas questões o diferencial de gestão que resultará em uma maior ou menor receita proveniente da concessão e, portanto, em um maior ou menor valor agregado para o seu acionista. Por fim, sensível à atualização tecnológica do parque de cargas atendido pelo sistema de distribuição das diversas concessionárias, bem como às suas novas características e necessidades, a agência reguladora vem elaborando normas e regulamentos cada vez mais exigentes quanto à qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Com o trabalho ora proposto, pretende-se estudar um sistema de controle dinâmico do nível de tensão que permita a redução da severidade de eventual variação de tensão de curta duração, bem como a redução da sensibilidade de determinadas cargas aos afundamentos momentâneos de tensão. Usualmente, as variações de tensão de curta duração são provocadas pela partida de grandes motores ou pelo excesso de carga reativa em regime permanente, enquanto que os afundamentos momentâneos de tensão são provocados por curtos-circuitos em pontos afastados da rede ou pelo chaveamento de dispositivos no sistema de distribuição, tais como: bancos de capacitores, reatores ou chaves de manobra. O esforço se faz, portanto, no sentido de se obter um menor número de paradas no processo produtivo aos quais as cargas de elevada sensibilidade estejam associadas, buscando, ainda, uma redução nas perdas

elétricas ao longo do sistema de distribuição. Outra preocupação deste projeto está relacionada ao desequilíbrio das tensões entre as fases, este provocado pelas diferenças de carregamento, por curtos-circuitos e pela atuação anômala de dispositivos de chaveamento e/ou proteção, de compensação de potência reativa e/ou regulação da tensão, buscando, assim, através do dispositivo de controle a ser estudado, uma forma de reequilíbrio dinâmico das fases e de regulação dinâmica das tensões em regime permanente.

Ressalta-se, na oportunidade, a relevância desta discussão, haja vista a nova regulamentação para o serviço de distribuição da energia elétrica, em fase de audiência pública, a ser publicada ainda este ano pela ANEEL, a saber: o chamado Procedimentos da Distribuição – PRODIST<sup>1</sup>, o qual atribui limites mínimos e/ou máximos para a regulação da tensão em regime permanente, para o desequilíbrio entre as tensões de fase e para as variações de tensão de curta duração, dentre vários outros fenômenos abordados. Tal preocupação por parte da agência reguladora encontra respaldo nos malefícios advindos da eventual falha das concessionárias que atuam no segmento para com a observância de limites mínimos práticos que viabilizem o bom funcionamento das cargas alimentadas. Isto porquê a regulação inadequada ou ineficiente das tensões em regime permanente, resultando em sobretensões ou subtensões nas instalações dos consumidores, além de causar a operação ineficiente ou inadequada de equipamentos<sup>2</sup>, bem como a rejeição das cargas mais sensíveis no caso da subtensão sustentada, pode ainda causar o sobreaquecimento de motores de indução<sup>3</sup> levando à sua queima por sobrecarga. Já o desequilíbrio nas tensões entre-fases resulta em problemas à operação, sobretudo, de cargas eletrônicas tais como os dispositivos para o controle de velocidade de motores, causando a sua rejeição do sistema elétrico pela atuação do seu esquema de proteção ou sua queima, sem mencionar a potencialização das correntes harmônicas geradas pelo equipamento, particularmente as componentes harmônicas de ordens ímpares. De maneira análoga à subtensão sustentada, o desequilíbrio nas tensões também causa o sobreaquecimento de motores de indução, exigindo que a máquina seja sobredimensionada para determinada aplicação nestas condições de operação. Por fim, as variações de tensão de curta duração resultam no problema de qualidade mais comum e de mais difícil solução. As causas para o fenômeno são diversas: curto-circuitos em locais remotos da rede, chaveamento de grandes bancos de capacitores, de reatores ou cargas,

---

<sup>1</sup> AP 014/2008 – Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica

<sup>2</sup> Iluminação deficiente ou aceleração/ desaceleração descontrolada de motores, por exemplo.

<sup>3</sup> Um regime de operação à 90% da tensão nominal implica em uma corrente de plena carga de 10 a 50% superior e em uma elevação da temperatura do motor de 10 a 15% [ 1 ], sem mencionar a redução do torque de partida da máquina



produzindo grandes prejuízos econômicos com a paralisação de processos industriais sensíveis.

Assim, o intuito deste estudo é buscar alternativas técnicas de curto e médio-prazos para a mitigação dos problemas supra relatados, mais especificamente o desequilíbrio entre os carregamentos de cada fase, a regulação dinâmica da tensão de fornecimento em regime permanente e a mitigação das variações de tensão de curta duração, analisando, para tanto, a utilização dos STATCOMs de forma distribuída nos sistemas elétricos de média tensão (classe de tensão 15 kV) de uma concessionária de distribuição, estes, usualmente, alimentando potências da ordem de 2,5 a 4,0 MVA, e com operação conjunta com os equipamentos clássicos para a mitigação de alguns dos fenômenos já citados, notadamente os reguladores de tensão e bancos de capacitores, com a sua instalação sendo prevista para as proximidades de grandes blocos de cargas que, eventualmente, surjam em pontos distantes da fonte.

Com o objetivo de proporcionar uma maior clareza nas informações a serem apresentadas, o presente texto foi elaborado de forma segmentada em capítulos, onde, no primeiro capítulo, busca-se posicionar o leitor acerca das motivações da presente pesquisa, bem como do cenário das análises desenvolvidas, fornecendo uma perspectiva dos objetivos a serem alcançados e uma visão geral da legislação existente acerca dos fenômenos elétricos para os quais se deseja propor uma solução técnica alternativa com o foco em sua mitigação. No segundo capítulo, as principais tecnologias utilizadas na mitigação dos desequilíbrios e dos afundamentos de tensão são abordadas, tendo por foco a regulação e o reequilíbrio da tensão em regime permanente, bem como o STATCOM como uma ferramenta viável na mitigação destes fenômenos, tanto em regime permanente, quanto durante eventos transitórios no circuito, fornecendo o embasamento matemático e teórico das análises desenvolvidas. Já o terceiro capítulo detalha os critérios e premissas utilizados na simulação de cada elemento constituinte do circuito sob análise, explicando as simplificações realizadas no modelo e os seus eventuais impactos nos resultados obtidos. O STATCOM é representado como uma fonte de tensão controlada. Ao longo do quarto capítulo, as análises são desenvolvidas a partir dos resultados obtidos em diversos cenários simulados, considerando estes as condições específicas de operação do circuito elétrico em estudo, bem como a mitigação dos fenômenos elétricos anteriormente descritos com a utilização apenas das técnicas clássicas, com a utilização apenas do STATCOM e, por fim, de ambas tecnologias em complementaridade. Por fim, a partir dos resultados apresentados no quarto capítulo, o quinto capítulo detalha as conclusões obtidas, ressaltando as vantagens e desvantagens intrínsecas a cada tecnologia e os

benefícios inerentes à sua utilização complementar, bem como sugerindo uma possível fronteira na qual o STATCOM pode vir a se tornar uma solução alternativa ou complementar às técnicas clássicas de mitigação dos fenômenos elétricos abordados neste trabalho.

### 1.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Em regime permanente, a conformidade de tensão elétrica é dada pela comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, referenciados aos valores nominais do sistema ou contratados junto ao consumidor, em relação aos níveis de tensão de atendimento especificados como Adequado, Precário e Crítico [ 2 ] e [ 3 ]. Os valores nominais são fixados em função dos níveis de planejamento do sistema de distribuição, de modo que haja compatibilidade com os níveis de projeto dos equipamentos elétricos de uso final. Já os valores contratados situam-se dentro de uma faixa de  $\pm 5\%$  em torno da tensão nominal de dado circuito, sendo pactuados com o consumidor no contrato de fornecimento específico. A Tabela I.1 apresenta as faixas para a tensão de atendimento, enquanto que a Fig. I.1 mostra as faixas de tensão de atendimento em relação à Tensão de Referência ( $T_R$ ).

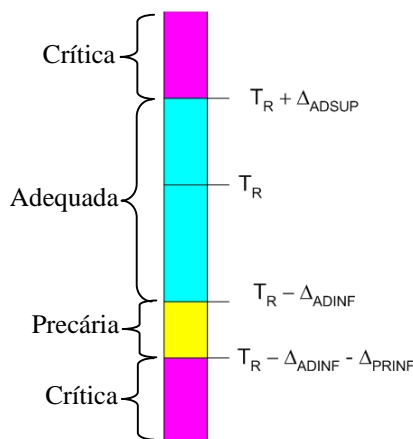


Fig. I.1. Faixas de tensão de atendimento em relação à tensão de referência.

Tabela I.1: Pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV [ 2 ].

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL < 0,93 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

## 1.2. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado à alteração dos padrões trifásicos do sistema de distribuição, sendo o fator de desequilíbrio de tensão ( $FD\%$ ) definido como a relação percentual entre o valor eficaz da tensão de componente de sequência negativa ( $V^-$ ) e o valor eficaz da tensão de sequência positiva ( $V^+$ ).

$$FD\% = \frac{V^-}{V^+} \cdot 100 \quad (1).$$

A versão atual do PRODIST [ 3 ], em audiência pública, propõe um limite de referência igual ou inferior a 2% para o fator de desequilíbrio em todos os barramentos de distribuição, à exceção da baixa tensão, para fins do planejamento elétrico das concessionárias em termos da qualidade da energia elétrica. Este limite de referência deverá ser, regulatoriamente, estabelecido em resolução específica, após período experimental de coleta de dados, a ser definido pela ANEEL. A título de informação, a norma NEMA standard MG-1<sup>4</sup>, utilizada nos EUA, permite apenas 1% de desequilíbrio de tensão. Acima deste limite, existe a necessidade de sobredimensionamento de motores nas suas aplicações, sendo que a operação acima de 5% de desequilíbrio não é recomendada.

## 1.3. VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO - VTCD

O fenômeno é definido como sendo uma redução no valor eficaz (rms) das tensões em corrente alternada, à frequência nominal, com duração de meio ciclo a alguns segundos [ 3 ], sendo classificado pelo PRODIST em “Variação Momentânea de Tensão”, quando apresentar duração inferior a 3 segundos, e em “Variação Temporária de Tensão”, quando sua duração for igual ou inferior a 1 minuto. A **Tabela I.2** apresenta a classificação da VTCD em relação à sua amplitude e duração.

Além dos parâmetros duração e amplitude definidos na **Tabela I.2**, a severidade da VTCD, medida entre fase e neutro de determinado barramento do sistema de distribuição, é também caracterizada pela frequência de ocorrência, correspondendo esta à quantidade de vezes que cada combinação dos parâmetros duração e amplitude ocorre em determinado período de tempo ao longo do qual o barramento tenha sido monitorado. Apesar de ainda não terem sido estabelecidos valores de referência para o desempenho dos barramentos das concessionárias de distribuição, estas deverão acompanhar e disponibilizar, em bases anuais,

---

<sup>4</sup> NEMA MG-1, 1998

o desempenho das suas barras de distribuição monitoradas, de sorte que tais informações poderão servir como referência de desempenho das barras de unidades consumidoras atendidas em AT e MT com cargas sensíveis às variações de tensão de curta duração.

Tabela I.2: Classificação das variações de tensão de curta duração [ 3 ].

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior a 1,1 p.u.

#### 1.4. CENÁRIO DA ANÁLISE

O cenário da presente análise constitui-se de um circuito de distribuição de energia elétrica em 13,8 kV, com uma extensão superior a 40 km e com derivações e ramificações que se assemelham às raízes de uma árvore, atendendo ao longo de seu percurso cargas das mais diversas naturezas, desde simples residências e pequenos comércios em seus trechos urbanos aos motores e bombas de irrigação das fazendas no meio rural, passando, ainda, por regiões litorâneas, de balneários, com uma forte característica sazonal. Não bastasse esta singularidade, considere este alimentador localizado em uma região terminal do Sistema Interligado Nacional - SIN, atendida a partir de circuitos radiais, e acrescente ao panorama relatado uma nova fronteira industrial que se abre em áreas antes eminentemente rurais, esta fomentada pela descoberta e exploração de campos de petróleo e gás natural, além da expansão da extração e beneficiamento do granito e do mármore para utilização na construção civil local e exportação. Esta é a realidade de grande parte dos alimentadores de distribuição isolados em 13,8 kV existentes no norte do Estado do Espírito Santo, região até bem pouco tempo atrás dedicada à fruticultura e à plantação da cana-de-açúcar e do eucalipto que, nos últimos anos, com a descoberta de campos de petróleo e gás natural nos seus mais remotos

rincões, vem experimentando um crescimento acima da média nacional, fomentando novos investimentos e com estes a sua industrialização.

Neste cenário, o planejamento do sistema elétrico se torna uma tarefa árdua, de difícil concussão, sendo, na maior parte das vezes, levado à reboque do desenvolvimento regional, penalizando, assim, os consumidores locais com índices de continuidade do fornecimento de energia elétrica e de conformidade do seu nível de tensão insatisfatórios aos seus propósitos de utilização, ainda que estes índices estejam dentro dos limites de tolerância previstos pela legislação pertinente. A degradação da qualidade dos serviços prestados em razão de fenômenos sazonais é, ainda, um fator dificultador para a solução do problema, pois apesar destes ampliarem as deficiências do sistema elétrico local, a sua característica temporal prejudica a realização de investimentos de monta, posto que, em uma análise econômico-financeira, estes não se viabilizam em razão da rentabilidade alcançada.

No presente trabalho, selecionou-se um alimentador da Subestação de Distribuição (SD) Linhares, com um longo trecho urbano e outro, ainda maior, rural, o qual atende às localidades de Povoação e Regência e, a uma distância de 45 km da subestação de origem, uma carga industrial de, aproximadamente, 2 MVA. Atualmente, a redução do afundamento na tensão de fornecimento é alcançado a partir da utilização de três bancos de capacitores automáticos de 600 kVAr distribuídos ao longo do circuito, entre o PCC e a fonte, associados à utilização de um banco regulador de tensão (RT) em série, constituído este por equipamentos monofásicos, o qual auxilia, ainda, no reequilíbrio das tensões em cada uma das fases, face à uma eventual diferença entre os seus carregamentos. A **Fig. I.2** retrata, de forma simplificada, a rede de distribuição em análise.

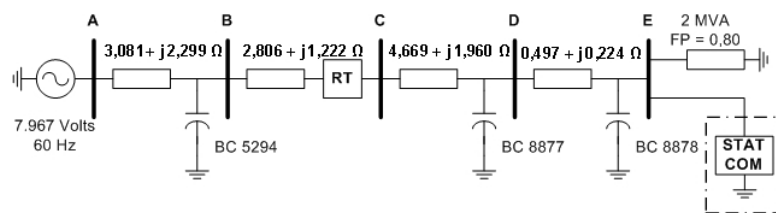


Fig. I.2: Diagrama unifilar da rede de distribuição de 13,8 kV.

## 1.5. CONCLUSÕES

No presente capítulo foram abordados alguns dos fenômenos elétricos mais comuns de um sistema de distribuição de energia elétrica, apresentando a sua definição e classificação segundo as normas vigentes, além de suas conseqüências para com a percepção da qualidade do serviço prestado pela concessionária e os malefícios que causam ao funcionamento

adequado das cargas alimentadas. Além disso, introduziu-se o leitor ao cenário das análises, ressaltando as suas características e peculiaridades em termos das cargas atendidas e distâncias envolvidas, bem como com relação às dificuldades para o desenvolvimento de um planejamento adequado dos investimentos necessários. Pretendeu-se, com isto, demonstrar a premente necessidade de se buscar alternativas técnicas de menor custo para a mitigação dos fenômenos abordados, favorecendo a melhoria da qualidade do serviço segundo os limites estabelecidos e o correto e adequado planejamento dos investimentos necessários pela concessionária.

## CAPÍTULO II

# TECNOLOGIAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

Neste capítulo encontram-se detalhadas as principais tecnologias usualmente empregadas para a regulação da tensão e mitigação do desequilíbrio de carregamento entre fases em sistemas de distribuição de média tensão e em unidades consumidoras, saindo das soluções mais tradicionais, tais como: banco de capacitores e reguladores de tensão, até as técnicas mais sofisticadas como, por exemplo, o Compensador Estático Síncrono - STATCOM.

### 2.1. BANCOS DE CAPACITORES

Em sistemas de distribuição em média tensão, classe 15 kV, a solução de menor custo e, portanto, mais tradicional, para a regulação da tensão é a instalação de bancos de capacitores ao longo do circuito, de forma que, com a compensação local da energia elétrica reativa demandada pelas cargas atendidas, haja uma redução na corrente elétrica distribuída e, assim, uma elevação na tensão de fornecimento. Usualmente, utilizam-se bancos fixos de capacitores em sistemas altamente indutivos e com pouca alteração no consumo da energia elétrica reativa ao longo do período diário, ou ainda, quando a queda de tensão não atingiu níveis críticos em função da variação desse consumo. Nos casos mais severos, a instalação de bancos de capacitores automáticos se faz necessária, representando estes uma sofisticação em relação à solução anterior, posto que entrarão em linha apenas quando necessários, ou seja, quando a queda de tensão no circuito alcançar um determinado valor considerado crítico.

No presente trabalho, considerando os tempos de atuação do STATCOM em relação ao chaveamento dos bancos de capacitores automáticos, optou-se por representá-los já em regime permanente, como meras cargas trifásicas capacitivas estáticas, em ligação estrela-aterrada, derivadas do circuito tronco. Ainda que a ligação estrela-aterrada seja usual na grande maioria das instalações de bancos capacitores, recentemente observou-se uma interação indesejável destes dispositivos com a rede, face a esta configuração, na qual os equipamentos de proteção eventualmente instalados nos terminais de saída das subestações de distribuição (SDs) e ao longo do circuito, vinham sendo danificados pela potencialização de correntes de seqüência zero e harmônicas pelos bancos de capacitores, notadamente existentes em circuitos com desequilíbrio de carregamento entre fases, malhas de terra ineficientes com

diferenças de potenciais significativas entre pontos de aterramentos distintos, sobretudo em razão do roubo dos cabos de neutro, e com a presença de cargas não-lineares. A solução encontrada foi alterar a forma de ligação dos bancos, retirando-lhe o terra, ou seja, os bancos passaram a ser ligados em estrela não-aterrada. Em [ 1 ], destaca-se que um dos grandes problemas relatados pelas concessionárias de distribuição é a operação indevida de chaves-fusível (ou São Mateus), pois, mesmo com a abertura do fusível em uma das fases, o banco de capacitores pode permanecer funcional, aumentando o desequilíbrio nas tensões, potencializando tensões harmônicas e, conseqüentemente, ampliando as perdas elétricas no circuito.

Por outro lado, com relação à ampla utilização de bancos de capacitores na regulação da tensão em sistemas de distribuição devido ao seu relativo baixo custo de investimento, ressalta-se um regime de operação no qual surtos de tensão e harmônicos serão observados a cada chaveamento do equipamento, prejudicando o funcionamento de cargas mais sensíveis a estes tipos de fenômenos. Outro problema advindo da utilização dos bancos de capacitores para a regulação do nível da tensão de fornecimento está associado à sua forma de chaveamento na rede, ou seja, ou se entra com todo o banco e eleva-se a tensão de um degrau correspondente, ou se tira o banco de operação e reduz-se a tensão da mesma forma. Assim, não existirá um ajuste fino para valores intermediários de queda de tensão no alimentador, de sorte que o chaveamento do banco deve ser estudado com cuidado e contar com um bom limite de segurança para que os eventuais surtos de tensão verificados não venham danificar equipamentos de consumidores. Por fim, um outro ponto a ser observado é que a atuação do banco ocorrerá simultaneamente nas três fases, ou seja, se houver desequilíbrio de tensão entre as fases do circuito causado por carregamentos distintos, este permanecerá independentemente da atuação do equipamento. Um maior detalhamento dos conceitos e premissas que cercam a utilização dos bancos de capacitores para a regulação da tensão pode ser observado em [ 1 ].

## **2.2. BANCOS REGULADORES DE TENSÃO**

A aplicação de reguladores de tensão nos sistemas de distribuição de energia elétrica teve início na década de 40, nos países desenvolvidos, principalmente EUA, em função de sua grande extensão territorial, onde os centros de consumo estão espalhados por vastas áreas, distantes dos pontos de geração, e, aliado a isso, o aparecimento de grande quantidade de novos aparelhos eletroeletrônicos, sensíveis às oscilações de tensão, fez aumentarem as



reclamações dos consumidores, que passaram a exigir uma melhor qualidade na distribuição de energia elétrica.

O princípio de funcionamento de um regulador de tensão é similar ao do autotransformador, ou seja, existe, além do acoplamento magnético entre os enrolamentos primário e secundário, um acoplamento elétrico, responsável este pela transmissão da maior parcela da potência elétrica entre as extremidades do equipamento. Dependendo do ponto de acoplamento elétrico entre os enrolamentos, o autotransformador pode apresentar um funcionamento de elevador de tensão ou de abaixador de tensão, permitindo impingir à carga um nível de tensão mais adequado ao seu funcionamento. Esta característica, porém, implica que, na obtenção de um nível de tensão mais elevado em seus terminais secundários, uma maior corrente será observada no circuito primário, deteriorando ainda mais o nível do afundamento de tensão à montante do equipamento e vice-versa no caso oposto. De sorte a se evitar comutações em avalanche e, assim, preservar a vida útil do equipamento, o regulador de tensão opera dentro de uma faixa de insensibilidade da tensão de  $\pm 2,5\%$  da tensão de referência, dentro da qual, mesmo que a tensão varie, nenhum comando de comutação dos *taps* será realizado [ 4 ]. Além deste recurso, o regulador trabalha com uma temporização de retardo para o acionamento da comutação em torno de 30 s, ou seja, apenas quando a tensão da rede amostrada pelo equipamento permanecer fora da faixa de insensibilidade por período superior a 30 s, a comutação dos *taps* será acionada. Em linhas gerais, a comutação entre os *taps* de um regulador de tensão, a partir da detecção da sobretensão ou do afundamento de tensão, demanda um intervalo de, pelo menos, 75 s, fazendo com que este equipamento se preste apenas para a regulação de tensão em regime permanente.

Usualmente, os reguladores de tensão instalados nas redes de distribuição são equipamentos monofásicos conectados entre si em ligação estrela ou triângulo. A amplitude da regulação possível de ser obtida dependerá do esquema de ligação interno dos reguladores de tensão de cada fase, de sorte que, em uma ligação do tipo estrela-aterrada ou triângulo-aberto, a regulação possível abrangerá  $\pm 10\%$  da tensão de referência, enquanto que em uma ligação do tipo triângulo-fechado, a regulação obtida será de  $\pm 15\%$  da tensão de referência [ 1 ] e [ 4 ]. O tipo de conexão interna a ser selecionada dependerá das características intrínsecas do sistema elétrico ao qual o regulador for acrescido e dos objetivos a serem alcançados pelo projetista em termos de isolamento de perturbações e regulação da tensão. Assim, a recomendação é que, se o banco de reguladores for ligado em estrela-aterrada, necessariamente, a fonte seja também em estrela-aterrada, para que a corrente de neutro devida aos possíveis desequilíbrios de carga do banco tenha caminho fechado para a terra e,

portanto, para a fonte. A utilização de equipamentos monofásicos associados em bancos trifásicos apresenta como vantagem a independência da regulação da tensão de uma fase em relação às outras, o que viabiliza a compensação individual do afundamento de tensão mesmo em condições de operação com desequilíbrio de carregamento entre as fases, restabelecendo o equilíbrio entre as tensões. Entretanto, em condições extremas de afundamento de tensão, o banco regulador de tensão convencional será pouco eficaz na mitigação do desequilíbrio de tensão entre as fases. Isto se deve ao fato de que, apesar do controle independente por fase, o objetivo principal do regulador é elevar ou reduzir a tensão, trazendo-a para um nível mais adequado. Se neste processo os limites de saturação do equipamento são alcançados, o efeito do desequilíbrio é propagado na rede, pois o controle de uma fase não está atrelado às demais. Por outro lado, apesar das vantagens na utilização de bancos de reguladores monofásicos em sistemas trifásicos, esta alternativa apresenta o inconveniente de ser uma solução de maior custo de implantação e de manutenção, de sorte que, por esta razão, algumas concessionárias vêm optando pela utilização de reguladores de tensão trifásicos, onde a regulação da tensão é realizada a partir da amostragem em uma das fases apenas. Tendo em vista a maior simplicidade da solução, esta resulta em uma maior robustez e facilidade de manutenção, a um custo inferior à alternativa anterior, ainda que inviabilize qualquer mitigação do desequilíbrio da tensão entre fases.

Com base nas premissas acima descritas, e considerando a necessidade de uma avaliação do funcionamento dinâmico do regulador de tensão versus o STATCOM, desenvolveu-se um modelo para o regulador de tensão com as ferramentas do MATLAB SIMPOWER SYSTEM BLOCKSET associando-se uma fonte de corrente, representando esta o acoplamento elétrico dos enrolamentos primário e secundário, e uma fonte de tensão, para a representação do acoplamento magnético e criação do  $\Delta V$  necessário à regulação da tensão. A **Fig. II.1** apresenta o esquema simplificado para o regulador de tensão, sendo seu detalhamento discutido em capítulo subsequente.

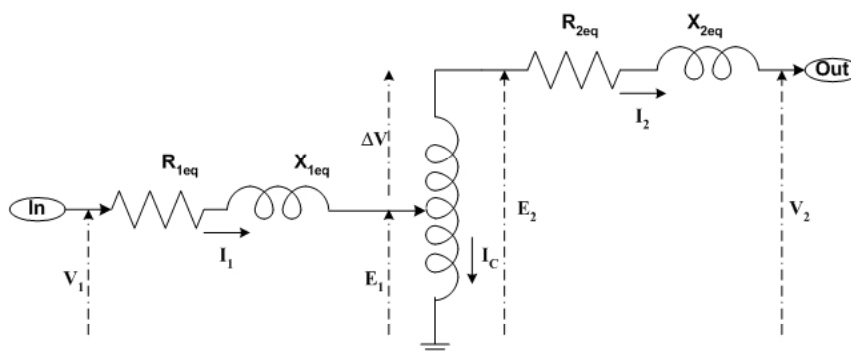


Fig. II.1: Modelo simplificado do regulador de tensão monofásico.

## **2.3. A REGULAÇÃO DA TENSÃO PELA COMPENSAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA**

A compensação da energia elétrica reativa é definida como o gerenciamento da potência reativa com o intuito da obtenção de um melhor desempenho dos sistemas de potência em corrente alternada [ 5 ]. Em geral, a questão da compensação da potência reativa possui duas abordagens distintas: a regulação da tensão de fornecimento e a compensação de cargas indutivas/ capacitivas conectadas à rede. Na primeira abordagem, o objetivo principal consiste na mitigação da flutuação na tensão de fornecimento causada pelos fenômenos elétricos comuns à operação dos sistemas de distribuição e de transmissão de energia elétrica, tais como: chaveamento de equipamentos e grandes motores, surtos de tensão e de corrente em pontos distantes do sistema, para citar os mais comuns. No caso da compensação de cargas, o intuito é a elevação do fator de potência do sistema, reequilibrando a potência real requerida da fonte e eliminando os componentes harmônicos de corrente gerados pelas grandes cargas industriais não-lineares e, com isto, compensar o eventual afundamento de tensão observado no ponto de conexão da carga (PCC) ao sistema.

Dispositivos compensadores de potência reativa, conectados em série e em paralelo com a fonte, são utilizados para modificar as características elétricas intrínsecas de um dado sistema de potência em corrente alternada. Os compensadores tipo série alteram os parâmetros do sistema de distribuição, enquanto que os compensadores tipo paralelo modificam a impedância equivalente da carga. Em [ 5 ], os princípios básicos da compensação da potência reativa encontram-se devidamente detalhados, bem como as principais topologias e o “estado da arte” das tecnologias para a compensação estática da potência reativa. A seguir, ressaltam-se as tecnologias mais relevantes para a compreensão do presente trabalho.

### **2.3.1. O COMPENSADOR SÍNCRONO ROTATIVO**

O compensador síncrono rotativo, juntamente com os bancos de capacitores e/ou de indutores estáticos e automáticos, foi uma das tecnologias mais amplamente empregadas na compensação da potência reativa até anos recentes [ 1 ]. Construtivamente, o compensador síncrono rotativo consiste de um motor síncrono, operando a vazio, conectado em paralelo ao barramento no qual se deseja regular a tensão. A compensação da potência reativa é, então, realizada a partir da variação da sua excitação de campo, sobre-excitando-o quando for necessário fornecer potência reativa para a rede ou sub-excitando-o para absorvê-la [ 1 ] e

[ 6 ]. O elevado custo para sua instalação distribuída e manutenção, bem como o espaço requerido dentro das subestações, tornaram esta tecnologia obsoleta e indesejável.

### 2.3.2. O COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS – SVC

A primeira topologia desenvolvida para um compensador estático *shunt* de potência reativa continuamente variável era baseada em um reator de núcleo de ferro saturado, durante as décadas de 1950 e 1960. Este esquema de reatores de multi-enrolamentos foi amplamente utilizada em instalações de distribuição e transmissão de energia elétrica no Reino Unido e adjacências até que houvesse a viabilidade econômica para a utilização dos dispositivos semi-condutores [ 7 ]. Usualmente, um SVC é composto de um reator controlado por tiristores (TCR) e capacitores fixos, sendo capaz de fornecer montantes distintos de potência reativa para cada uma das fases do sistema elétrico ao qual estiver conectado, de sorte a reduzir as correntes de sequência negativa circulantes e ajustar o fator de potência para um valor o mais próximo possível do unitário, de tal forma que a fonte de potência forneça apenas correntes equilibradas e em fase [ 8 ]. A rápida resposta dinâmica, o baixo custo operacional e a elevada confiabilidade do SVC são as vantagens conhecidas deste dispositivo que viabilizam a sua utilização no reequilíbrio do carregamento entre fases e na geração da potência elétrica reativa necessária à correção do fator de potência da carga. Entretanto, o TCR introduz correntes harmônicas indesejáveis no sistema, requerendo, portanto, o emprego de esquemas específicos para a sua mitigação [ 8 ]. Adicionalmente, em razão desta singularidade, os capacitores fixos estão sempre sintonizados com pequenos reatores que atuam como filtros passivos nas frequências harmônicas características do TCR, tendo-se, ainda, o cuidado de se adotar as técnicas necessárias para a eliminação de qualquer ressonância série ou paralela do filtro passivo com a impedância da fonte. A **Fig. II.2** apresenta o esquema clássico de um SVC conectado à barra de carga, onde o banco de capacitores encontra-se representado na configuração de um filtro passivo.

O SVC atua como um compensador convencional de potência reativa, compensando a componente na frequência fundamental das correntes de sequência negativa e a parcela imaginária das correntes de sequência positiva [ 8 ]. Para tanto, a soma das correntes de sequência negativa na frequência fundamental imputadas à carga, ao TCR e ao filtro passivo deverá resultar em um valor nulo, assim como a soma da parcela imaginária das correntes de sequência positiva, também na frequência fundamental, imputadas a estes mesmos dispositivos. As expressões (2) e (3) demonstram esta condição.

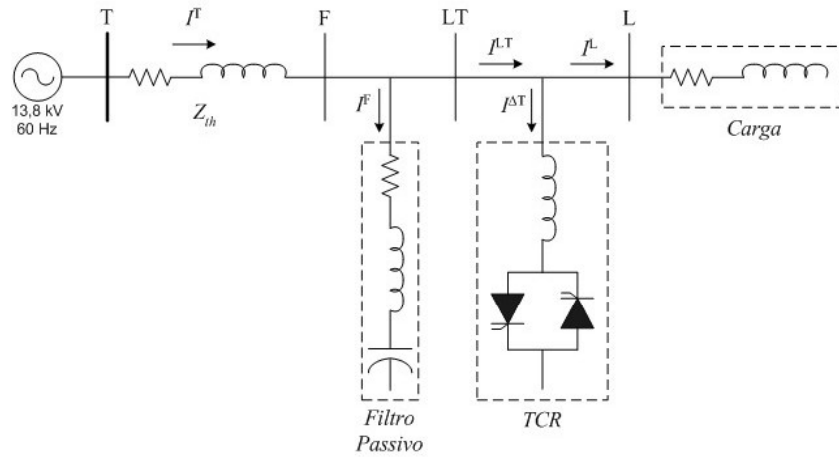


Fig. II.2: Circuito de distribuição com um SVC na barra de carga.

$$\bar{I}_L^{-,1} + \bar{I}_{\Delta T}^{-,1} + \bar{I}_F^{-,1} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Im}(\bar{I}_L^{+,1} + \bar{I}_{\Delta T}^{+,1} + \bar{I}_F^{+,1}) = 0 \quad (3)$$

Onde os subscritos L,  $\Delta T$  e F correspondem à carga, ao TCR e ao filtro passivo e os sobrescritos +, - e 1 à componente de sequência positiva e negativa e à frequência fundamental, respectivamente.

### 2.3.3. O COMPENSADOR ESTATICO SÍNCRONO – STATCOM

A utilização dos compensadores estáticos síncronos de potência reativa – STATCOMs em unidades consumidoras ainda enfrenta restrições em termos do nível potência e da tensão de alimentação, notadamente em razão da capacidade das chaves semicondutoras utilizadas de suportar tensões elevadas em seus terminais, bem como em termos de condução de corrente. Entretanto, estas limitações vêm sendo contornadas pela utilização de dispositivos com topologias construtivas multi-níveis [ 5 ] e pelo grande desenvolvimento tecnológico do segmento de dispositivos semicondutores. Diante deste cenário, o emprego de dispositivos STATCOMs em redes de distribuição de média tensão, em substituição às soluções tradicionais de mitigação do desequilíbrio e do afundamento na tensão de fornecimento, tem grandes chances de se popularizar nos próximos anos, face às maiores exigências regulatórias em termos da qualidade do fornecimento e na maior otimização na alocação dos investimentos realizados neste sentido. O desequilíbrio das tensões entre fases é, ainda, um dos grandes problemas enfrentados pelas diversas técnicas de regulação da tensão, posto que este é extremamente prejudicial ao bom funcionamento de motores, uma vez que causa aquecimento desnecessário, comprometendo sua capacidade plena de funcionamento. Em [ 9 ] e [ 10 ], os malefícios do desequilíbrio nas tensões é abordado sob a ótica da operação do

STATCOM, sendo proposta uma técnica de controle para o dispositivo baseada na teoria da decomposição de um sistema elétrico em suas componentes de seqüência positiva, negativa e zero. A técnica discutida apresenta como grande vantagem a possibilidade do controle das componentes de seqüência negativa que fluem através do STATCOM, permitindo que o dispositivo possa ser utilizado no reequilíbrio das tensões entrefases do sistema à despeito do desequilíbrio de carregamento previamente observado.

O princípio básico de funcionamento do STATCOM [ 10 ], [ 11 ] consiste na injeção de uma corrente senoidal de amplitude variável no PCC em quadratura com a tensão de linha, de sorte que simula uma fonte indutiva ou capacitiva no ponto de sua conexão. Esta característica é empregada na regulação da tensão da rede. A **Fig. II.3** descreve o princípio de funcionamento do STATCOM através de um diagrama simplificado do sistema elétrico e do STATCOM, os quais são representados pelas fontes de tensão  $V_S$  e  $V_I$ , respectivamente. Os diagramas fasoriais das tensões e correntes correspondentes são apresentados na **Fig. II.4**, considerando-se a resistência nula. Assim, considerando que as potências ativas e reativas entre as duas fontes de tensão podem ser descritas através de (4) e (5), em regime permanente, temos:

- Para  $V_I$  adiantada de  $V_S$ , **Fig. II.4** (a), o STATCOM injeta potência ativa na rede ( $P_S < 0$ ), descarregando o capacitor do elo de corrente contínua e, conseqüentemente, reduzindo  $V_I$ ;
- Para  $V_I$  atrasada de  $V_S$ , **Fig. II.4** (b), o STATCOM absorve potência ativa da rede ( $P_S > 0$ ), carregando o capacitor e, assim, aumentando  $V_I$ ;
- Quando as tensões  $V_I$  e  $V_S$  estão em fase e  $|V_I| = |V_S|$ , **Fig. II.4** (c), não existe fluxo de potência ativa ou reativa entre o STATCOM e a rede ( $P_S = 0$  e  $Q_S = 0$ );
- Se as tensões  $V_I$  e  $V_S$  estão em fase e  $|V_I| < |V_S|$ , **Fig. II.4** (d), o fluxo de potência ativa continuará sendo nulo ( $P_S = 0$ ), porém haverá fluxo de potência reativa da rede para o STATCOM ( $Q_S > 0$ ), isto é, o STATCOM atua como um banco controlado de reatores;
- Por fim, se as tensões  $V_I$  e  $V_S$  estão em fase e  $|V_I| > |V_S|$ , **Fig. II.4** (e),  $P_S = 0$  e haverá troca de potência reativa capacitiva do STATCOM com a rede ( $Q_S < 0$ ), isto é, o STATCOM atua como um banco controlado de capacitores;

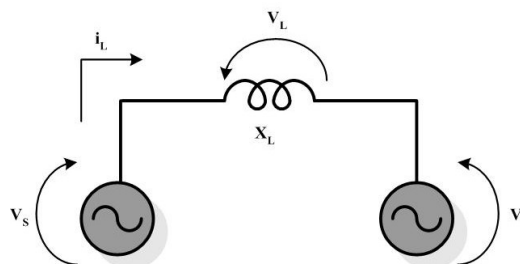


Fig. II.3: Diagrama simplificado de duas fontes de tensão conectadas por uma reatância  $X_L$ .

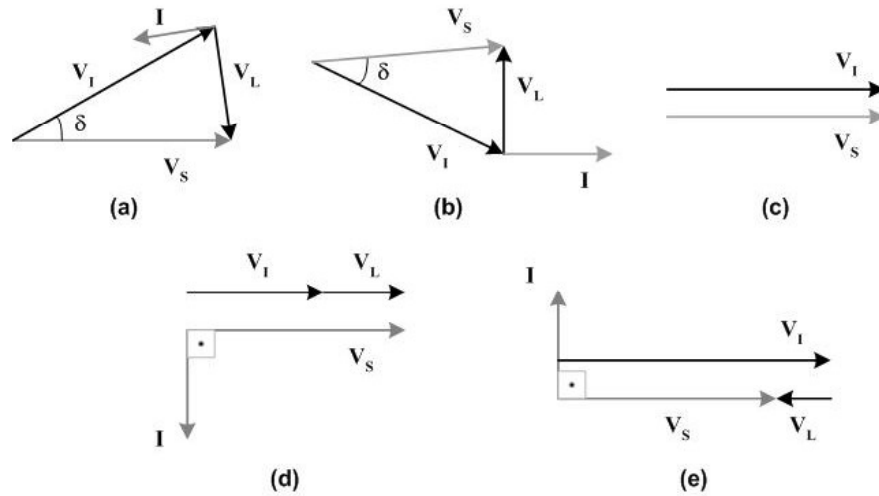


Fig. II.4: Diagramas fasoriais das tensões e correntes do sistema elétrico e do STATCOM.

$$P_s = \frac{V_s \cdot V_L}{X_L} \cdot \sin \delta \quad (4)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s \cdot V_L}{X_L} \cdot \cos \delta \quad (5)$$

#### 2.3.3.1. Análise do Perfil da Tensão no Ponto de Conexão da Carga em Regime Permanente

Em [ 11 ], está demonstrado que, para um dado sistema constituído por uma fonte de tensão, uma carga com partes ativa e reativa, uma reatância indutiva entre a fonte de tensão e a carga e um STATCOM, conforme apresentado na **Fig. II.5**, o diagrama fasorial de tensões e correntes da **Fig. II.6** pode ser deduzido, supondo-se que a carga reativa seja indutiva e desconsiderando-se a presença do STATCOM.

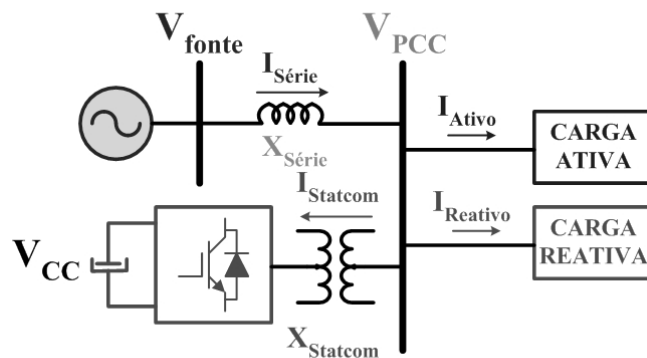


Fig. II.5: Sistema elétrico simplificado com STATCOM

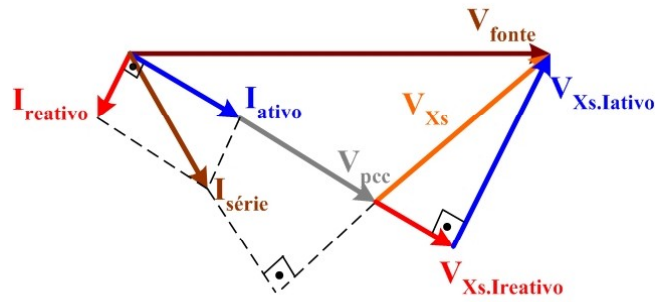


Fig. II.6: Diagrama fasorial do sistema simplificado sem o STATCOM.

Na **Fig. II.6**, a queda de tensão na reatância série ( $X_s$ ) devida à parcela reativa da carga alimentada é representada pela componente  $V_{Xs.Ireativo}$ , enquanto que a componente  $V_{Xs.Iativo}$  representa a queda de tensão devida à parcela ativa. A partir do diagrama fasorial apresentado, a expressão (6) é facilmente obtida.

$$V_{fonte}^2 = (V_{pcc} + V_{Xs.Ireativo})^2 + V_{Xs.Iativo}^2 \quad (6)$$

Resolvendo-se (6) para  $V_{pcc}$ , obtém-se a expressão (7), a qual demonstra que a tensão no ponto de conexão da carga ( $V_{pcc}$ ) é dependente das variáveis  $I_{reativo}$ ,  $I_{ativo}$  e  $V_{fonte}$  e de um parâmetro fixo  $X_s$ .

$$V_{pcc} = -X_s \cdot I_{reativo} + \sqrt{V_{fonte}^2 - X_s^2 \cdot I_{ativo}^2} \quad (7)$$

Agora, considerando-se a presença de um STATCOM no PCC e supondo que este apresente uma corrente reativa capacitiva de módulo menor do que a corrente reativa indutiva da carga, de tal sorte que a corrente reativa total no conjunto “STATCOM + Carga” seja dada por  $I_{liq} = I_{reativo} - I_{st}$ , onde  $I_{liq}$  é a corrente reativa líquida do conjunto “STATCOM + Carga”, uma componente  $V_{Xs.Ist}$  surge para representar a queda de tensão em  $X_s$  devida à corrente do STATCOM. A **Fig. II.7** apresenta o novo diagrama fasorial então obtido.

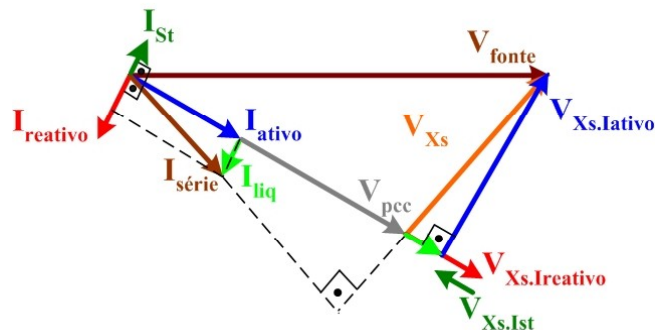


Fig. II.7: Diagrama fasorial das tensões e correntes do sistema elétrico com o STATCOM.

De forma análoga ao anteriormente realizado, a partir do diagrama fasorial apresentado na **Fig. II.7** a expressão (8) é obtida.

$$V_{pcc} = -X_s \cdot I_{liq} + \sqrt{V_{fonte}^2 - X_s^2 \cdot I_{ativo}^2} \quad (8)$$



A partir da expressão (8) várias análises podem ser realizadas, de sorte a se estabelecer a interdependência entre as variáveis e a sua correlação com  $V_{pcc}$ , ora partindo-se de uma premissa onde não haja variação na tensão da fonte, para um dado valor fixo de  $X_s$ , e variando-se  $I_{liq}$  e  $I_{ativo}$ ; ora de uma premissa onde não haja variação na corrente ativa da carga ( $I_{ativo}$ ), variando-se  $I_{liq}$  e a tensão da fonte ( $V_{fonte}$ ), como demonstrado em [ 11 ]. Procedendo dessa forma, para o caso em que a tensão da fonte não varia, as **Fig. II.8**, **Fig. II.9** e **Fig. II.10** foram obtidas para um valor fixo de  $X_s$  igual a 0,2 p.u.. O sinal negativo para os valores de  $I_{reativo}$  refere-se à faixa de correntes reativas capacitivas, enquanto que o sinal positivo à faixa de correntes reativas indutivas. A **Fig. II.8** demonstra que a manutenção da tensão no PCC em um valor igual a 1,0 p.u., para um aumento na corrente ativa da carga, depende que a corrente líquida do conjunto “STATCOM + Carga” torne-se capacitiva, ou seja, a corrente do STATCOM deverá ser ligeiramente superior à corrente reativa da carga. Por outro lado, nota-se que a influência da corrente ativa da carga na tensão  $V_{pcc}$  é pequena. De forma análoga, na **Fig. II.9** está demonstrado como varia a tensão  $V_{pcc}$  para vários valores de correntes ativa e reativa da carga. Na **Fig. II.10**, as curvas demonstrando a relação de  $V_{pcc}$  em função da corrente reativa da carga, para vários valores da corrente ativa da carga, permitem observar a grande sensibilidade na variação da tensão  $V_{pcc}$  para pequenas variações na corrente reativa da carga.

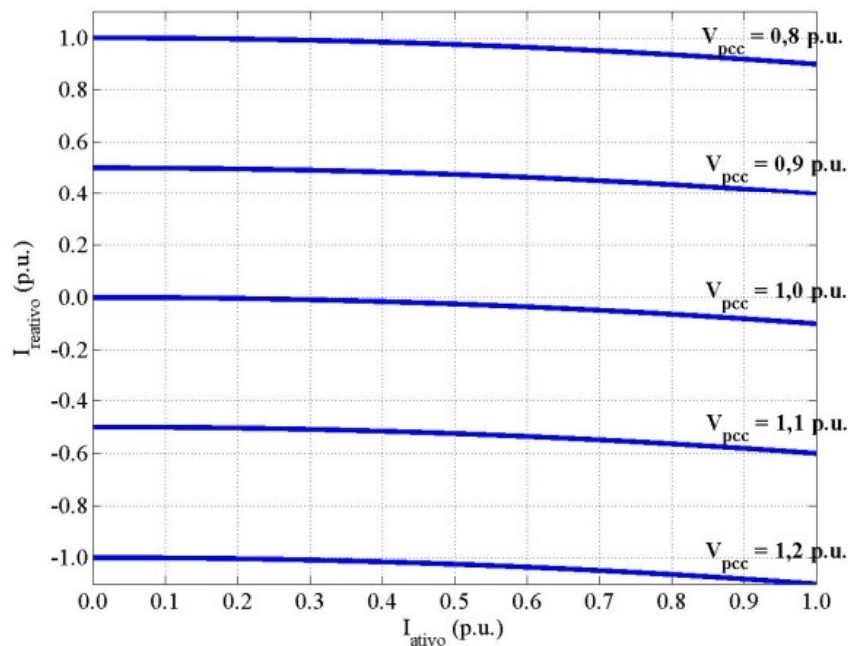


Fig. II.8: Valores de correntes ativa e reativa para cada curva de  $V_{pcc}$  constante, para uma tensão na fonte invariável.

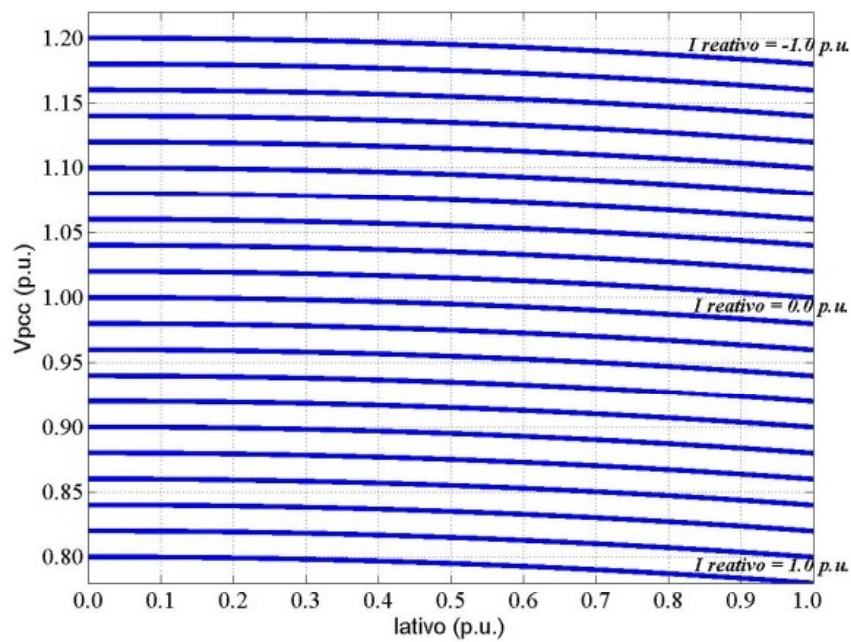


Fig. II.9: Valores de corrente ativa e  $V_{pcc}$  para cada curva de  $I_{reativo}$  constante, para uma tensão da fonte invariável.

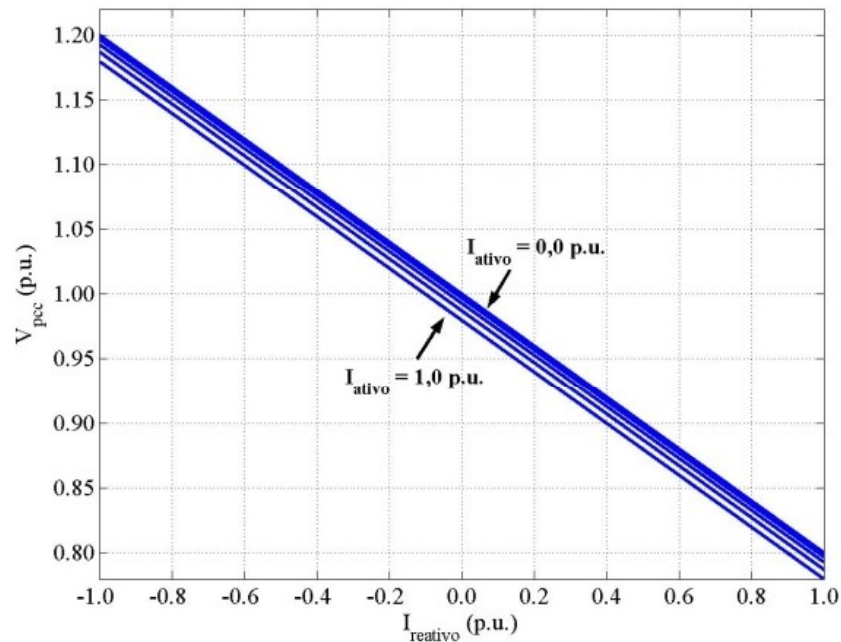


Fig. II.10: Valores de corrente reativa e  $V_{pcc}$  para cada reta de  $I_{ativo}$  constante, para uma tensão da fonte invariável.

Por outro lado, para o caso em que não haja variação na corrente ativa da carga, mas haja variação na tensão da fonte e na corrente líquida do conjunto “STATCOM + Carga”, as **Fig. II.11** e **Fig. II.12** são obtidas. A **Fig. II.11** nos permite observar que, para um afundamento de 0,1 p.u. na tensão da fonte, a corrente reativa líquida deve sair de 0,1 p.u. capacitivo para um valor aproximado de 0,55 p.u. capacitivo para que a tensão  $V_{pcc}$  se mantenha em 1,0 p.u.. Tal fato nos mostra que, quando houver variações na tensão da fonte, a capacidade do STATCOM utilizado deve ser muito superior àquela que seria necessária para

o caso em que apenas a corrente reativa da carga varia. Por fim, a **Fig. II.12** exibe as curvas da tensão  $V_{pcc}$  em função de  $I_{reativo}$  para diferentes valores de tensão na fonte  $V_{fonte}$ .

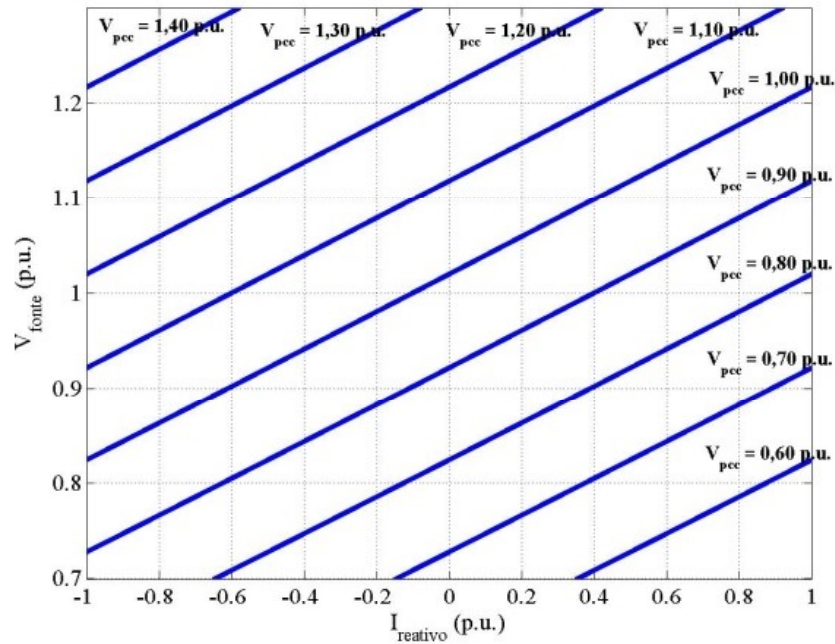


Fig. II.11: Relação da corrente ativa e tensão na fonte para diferentes valores de  $V_{pcc}$ , para uma corrente ativa da carga invariável.

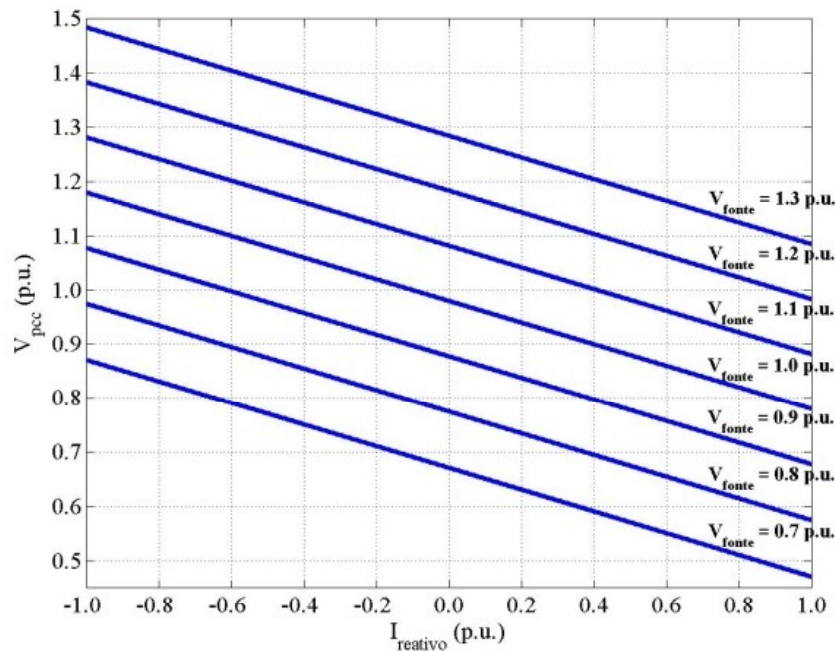


Fig. II.12: Valores de corrente reativa e da tensão  $V_{pcc}$  para cada reta  $V_{fonte}$  constante, para uma corrente ativa da carga invariável.

### 2.3.3.2. Análise da Sensibilidade da Tensão no Ponto de Conexão da Carga

Uma análise da sensibilidade da tensão  $V_{pcc}$  em relação aos parâmetros discutidos no tópico anterior pode ser desenvolvida derivando-se parcialmente a expressão (8) em relação a cada um destes parâmetros. Assim, derivando-a parcialmente em relação a  $I_{liq}$ , a expressão (9)

mostra que a variação na tensão  $V_{pcc}$  devida a  $I_{liq}$  depende exclusivamente da reatância série do sistema ( $X_s$ ), ou seja, variações em  $I_{liq}$  causarão alterações na tensão  $V_{pcc}$  proporcionais aos valores de  $X_s$ .

$$\frac{\partial V_{pcc}}{\partial I_{liq}} = -X_s \quad (9)$$

A expressão (10) é o resultado da derivação parcial da expressão (8) em relação a  $I_{ativo}$ , de onde nota-se a pouca influência que uma variação em  $I_{ativo}$  causa na tensão  $V_{pcc}$ , posto que o valor  $-X_s^2$  é, normalmente, próximo de zero.

$$\frac{\partial V_{pcc}}{\partial I_{ativo}} \cong -\frac{X_s^2 \cdot I_{ativo}}{V_{fonte}} \quad (10)$$

Por fim, derivando-se parcialmente a expressão (8) em relação a  $V_{fonte}$  obtém-se (11) que demonstra a grande dependência da tensão  $V_{pcc}$  em relação à tensão da fonte.

$$\frac{\partial V_{pcc}}{\partial V_{fonte}} \cong 1 \quad (11)$$

Os resultados obtidos a partir da presente análise de sensibilidade trazem informações valiosas acerca do dimensionamento da capacidade do STATCOM a ser utilizado em cada situação. De fato, se uma dada variação na corrente ativa da carga ( $I_{ativo}$ ) implica em  $\Delta V_{pcc} = -X_s^2$  p.u., para uma tensão da fonte  $V_{fonte} = 1,0$  p.u. e para uma corrente ativa da carga  $I_{ativo} = 1,0$  p.u., quando a reatância série do sistema  $X_s = 0,2$  p.u. a variação máxima na tensão  $V_{pcc}$  será igual a 4%. Da expressão (8), tem-se que para a compensação desta queda de tensão com o STATCOM seria necessária uma corrente reativa capacitiva de, aproximadamente, 0,1 p.u., ou seja, bastaria um STATCOM de 0,1 p.u. de potência. O raciocínio é análogo para o caso de uma variação na corrente reativa da carga ( $I_{reativo}$ ). Porém, para um  $X_s = 0,2$  p.u. a variação na tensão  $V_{pcc}$  em relação à variação da corrente reativa da carga  $I_{reativo}$  será de 20%. Neste caso, para compensar a queda de tensão no ponto de conexão da carga a capacidade do STATCOM deve ser tal que compense toda a corrente reativa requerida pela carga. Se esta for 1,0 p.u., a capacidade do STATCOM também deverá ser de 1,0 p.u.. Novamente, a partir da expressão (8) e para  $X_s = 0,2$  p.u. e  $I_{ativo} = 1,0$  p.u., mas desta vez analisando uma variação na tensão da fonte, um afundamento de 10% na tensão da fonte torna necessário que o STATCOM compense toda a corrente reativa da carga e, ainda, forneça uma corrente adicional de cerca de 61%, ou seja, a capacidade requerida para o STATCOM será de 1,61 p.u..

Dessa forma, diante do exposto, percebe-se que a definição da capacidade do STATCOM deve ser estudada individualmente para cada aplicação, pois esta dependerá, principalmente, da reatância série do circuito entre a fonte e o ponto de conexão da carga, da potência reativa da carga e da possível variação de tensão na fonte.

Em [ 11 ], encontra-se demonstrado a grande correlação entre as curvas teóricas ora exibidas e as curvas práticas obtidas da simulação de um STATCOM *quasi-24 pulsos* de 60 kVAr, sendo o erro encontrado entre os valores teóricos e práticos imputado à falta de modelagem das perdas nos condutores, das perdas no chaveamento dos conversores e das correntes de magnetização dos transformadores do STATCOM simulado.

## 2.4. CONCLUSÕES

Ao longo do CAPÍTULO II foram detalhadas as principais tecnologias empregadas na regulação e no reequilíbrio das tensões entrefases de um sistema de distribuição em média tensão, apresentando-se um breve histórico de sua aplicação, princípio de funcionamento e finalidade básica, bem como as vantagens e desvantagens associadas à sua utilização. Observou-se as limitações dos bancos de capacitores quando à compensação de potência reativa para fins de regulação da tensão, uma vez que estes dispositivos não permitem grandes ajustes para a compatibilização do nível de tensão dentro das faixas de tolerância exigidas para a tensão de fornecimento, apesar de proporcionarem uma redução significativa na corrente total circulante. Também os reguladores de tensão apresentam características desfavoráveis, pois, apesar de permitirem um ajuste razoável no nível de tensão, este se faz com impacto negativo na queda de tensão à montante de seu ponto de instalação, ou seja, a elevação da tensão à jusante implica em uma maior corrente à montante e, portanto, em uma maior queda de tensão e vice-versa. Ademais, ambos dispositivos se prestam apenas à regulação em regime permanente, face aos longos tempos necessários ao seu chaveamento. Já compensação dinâmica da potência reativa para a regulação da tensão foi abordada discutindo-se os principais dispositivos desenvolvidos para tal fim. Viu-se que o compensador síncrono rotativo encontra-se em desuso em razão dos custos envolvidos e das suas grandes dimensões. Com relação ao SVC verificou-se a maior complexidade de sua instalação em relação ao STATCOM e a presença de características indesejáveis, tais como a introdução de correntes harmônicas. Como aspectos positivos o SVC apresenta uma rápida resposta dinâmica, um baixo custo operacional e elevado grau de confiabilidade. Por fim, o STATCOM foi abordado em maior nível de detalhe, posto que as suas características

construtivas mais simples e compactas permitiriam o desenvolvimento de um protótipo para a utilização distribuída em circuitos de alimentação de média tensão com relativa facilidade, uma vez que questões restritivas como a capacidade das chaves semicondutoras de suportar tensões elevadas em seus terminais e de conduzirem correntes de maior magnitude têm sido rapidamente superadas com o desenvolvimento de novas tecnologias de semicondutores e de novas topologias construtivas para os inversores de frequência. Por fim, a partir das análises do perfil e da sensibilidade da tensão no ponto de conexão da carga, foram obtidas conclusões relevantes acerca do dimensionamento da capacidade do STATCOM a ser utilizado em cada situação observada.

## CAPÍTULO III

### MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA

### UTILIZANDO O MATLAB SIMPOWER SYSTEMS

Neste capítulo encontram-se detalhados os modelos utilizados para os principais elementos constituintes da rede de distribuição em análise no presente estudo, comentando as simplificações realizadas em razão das premissas estabelecidas e dos objetivos a serem alcançados.

#### 3.1. REDE DE DISTRIBUIÇÃO 13,8 KV

Na **Fig. I.2**, a rede de distribuição foi representada com base na impedância da linha vista à montante do ponto de instalação de cada um dos equipamentos utilizados para a mitigação do afundamento de tensão e desequilíbrio de carregamento entre fases, sob a ótica da carga em análise (Thèvenin). Esta técnica radializou o alimentador eliminando as derivações sem relevância prática para o presente estudo.

#### 3.2. BANCOS DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores de 600 kVAr trifásicos instalados no circuito real são de operação automática, prestando-se à regulação dos níveis da tensão de fornecimento em regime permanente. Como os tempos para a sua atuação são muito superiores em relação àquele do STATCOM, assim como o número de vezes em que este é inserido ou retirado do sistema é bastante inferior ao número de vezes que o banco regulador de tensão alterará seu *tap* de regulação, optou-se por representá-los como um banco de capacitores trifásico conectado em derivação com a carga, em uma configuração estrela-aterrada, já em regime permanente. Ou seja, quando do início da simulação, todos os bancos de capacitores já estão inseridos no circuito à plena capacidade.

#### 3.3. BANCO REGULADOR DE TENSÃO

Não foi possível identificar, na documentação técnica até então elaborada, nenhum modelo para a simulação do funcionamento dinâmico de um banco de regulador de tensão.

Talvez por se tratar de um equipamento com utilização amplamente difundida desde a década de 1940 e com comportamento real bastante aproximado ao teórico, com longo tempo de atuação, o seu funcionamento seja desprezado nas análises, sobretudo em regime transitório, partindo-se sempre do princípio de que o sistema já se encontra em regime permanente. No presente estudo, como o foco é a avaliação da interação de técnicas tradicionais de regulação da tensão de fornecimento e do desequilíbrio de carregamento entre fases, fez-se necessária a representação do equipamento com um maior nível de detalhes. O tempo de atuação do modelo foi reduzido consideravelmente, de sorte a compatibilizá-lo com o tempo da simulação sem que, entretanto, houvesse qualquer prejuízo à análise desenvolvida. Para simular a regulação da tensão na forma como esta se verifica na prática em equipamentos desta natureza, a habilitação do controle é realizada em rampa, com um retardo de 100 ms em relação ao regime permanente. A **Fig. III.1** detalha o modelo desenvolvido para um regulador de tensão monofásico.

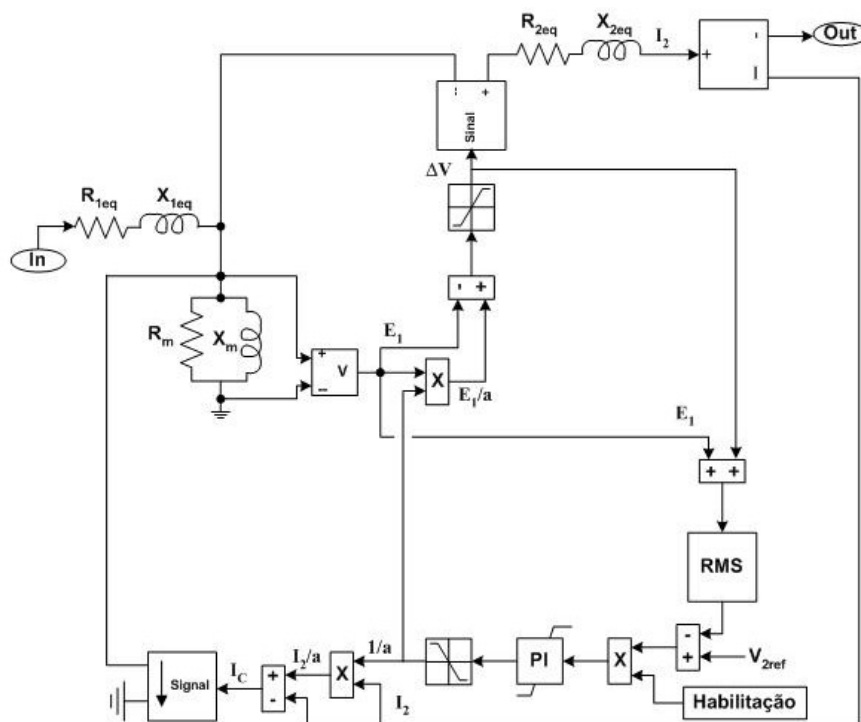


Fig. III.1: Modelo de simulação do regulador de tensão.

Como num auto-transformador clássico, o modelo da simulação considera a existência de um enrolamento comum entre os seus terminais primários e secundários, bem como o acoplamento magnético existente entre os circuitos, resultando numa relação de transformação  $a = E_1 / E_2$ . Por conveniência, o inverso da relação de transformação ( $1/a$ ) é ajustado para se obter a tensão secundária desejada, através de uma malha de controle contendo um controlador PI. A parcela da tensão induzida por acoplamento magnético é dada



por  $\Delta V = (E_1 / a - E_1)$ , e no modelo da simulação é representada por uma fonte controlada de tensão. De forma análoga, a corrente na bobina comum é dada por uma fonte controlada de corrente ( $I_c = I_2 / a - I_2$ ). O presente modelo regula a tensão de fornecimento dentro de uma faixa de atuação de  $\pm 10\%$  do valor nominal como no equipamento real. Entretanto, este não contempla a simulação da faixa de insensibilidade do equipamento de  $\pm 2,5\%$ , posto não ser esta relevante à presente análise.

### 3.3.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO REGULADOR DE TENSÃO

A impedância série de um regulador de tensão é de, aproximadamente, 10% (dez por cento) da impedância série de um transformador convencional de relação 13,8/0,22-0,127 kV, a qual gira em torno de 3% a 4% em média. Assim, para uma corrente nominal de 200 A por fase, a impedância base do transformador convencional será dada pela expressão (12) e a impedância série do regulador de tensão é obtida pela expressão (13):

$$V_{fase} = Z_{base} \cdot I_{fase}$$

$$Z_{base} = \left( \frac{13.800}{\sqrt{3}} \right) \cdot \frac{1}{200} = 39,8372 \, \Omega \quad (12)$$

$$Z_{RT} = 10\% \cdot 3\% \cdot Z_{base} \quad \therefore \quad Z_{RT} = 0,11951 \, \Omega \quad (13)$$

Como a parcela mais significativa da impedância série do regulador de tensão será proveniente da reatância equivalente, pode-se considerar que  $X_{eq} \approx Z_{RT}$ , de sorte que a indutância equivalente de seus enrolamentos será de, aproximadamente,  $L_{eq} = 0,317 \, mH$ . Por fim, um valor factível para a sua resistência série equivalente seria considerá-la em torno de 20% da impedância série do regulador de tensão, ou seja,  $R_{eq} \cong 23,902 \, m\Omega$ .

Para a determinação dos parâmetros do ramo *shunt* que representa a magnetização entre os enrolamentos do regulador de tensão, buscou-se definir um valor suficientemente elevado, em torno de 500 p.u., tanto para a resistência ( $R_m$ ), quanto para a indutância de magnetização ( $L_m$ ). Assim, fixou-se  $R_m = 20 \, k\Omega$  e  $L_m = 20 \, k\Omega / 2\pi f = 53,04 \, H$ .

## 3.4. COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS - STATCOM

A **Fig. III.2** detalha o esquema de ligação de um compensador síncrono de potência reativa em paralelo com a rede. O modelo simulado no presente estudo permite a compensação de componentes de sequência zero [ 9 ]. Em [ 5 ] e [ 12 ] encontram-se

detalhadas as principais configurações construtivas para dispositivos STATCOMs, seu princípio de funcionamento e as diversas aplicações.

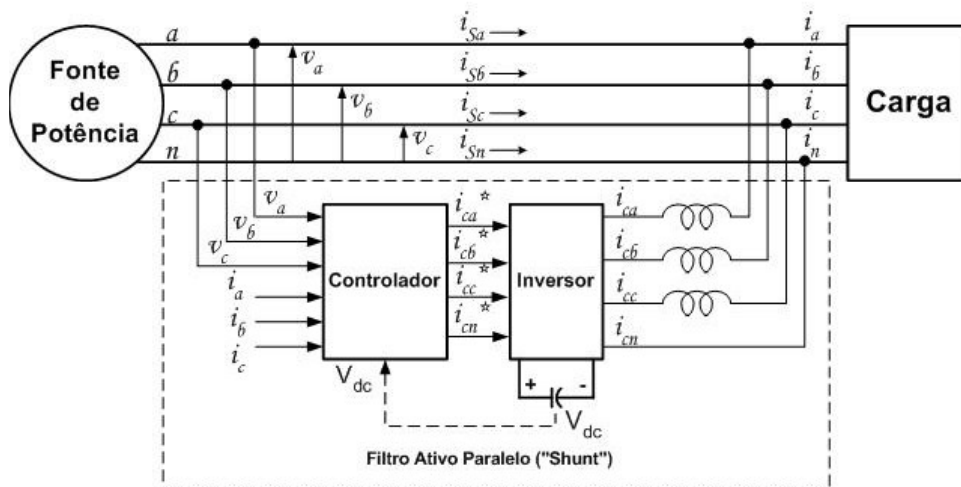


Fig. III.2: Compensador "Shunt" de Energia Reativa.

Na **Fig. III.2**, as tensões são amostradas em cada uma das fases em relação ao neutro do sistema, alimentando o controlador que gerará o sinal de referência para o acionamento do inversor em um esquema de modulação por largura de pulso (PWM). A tensão na malha de corrente contínua ( $V_{dc}$ ) também é amostrada e alimentada no controlador para o equilíbrio de sua operação de carga e descarga do capacitor associado. O impacto do dimensionamento do capacitor de corrente contínua é discutido em [ 13 ]. Quanto maior for o capacitor, menores ripples de tensão em corrente contínua ocorrem, melhorando o desempenho do dispositivo com relação à geração de tensões e correntes harmônicas, ou seja, a taxa de distorção harmônica total causada pelo dispositivo tenderá ser menor quanto maior for a capacitância em seu elo de corrente contínua. Dessa forma, conforme anteriormente já demonstrado, no caso de um afundamento de tensão, o STATCOM atua como um capacitor injetando uma corrente reativa no sistema para dar suporte à tensão na barra do PCC. Na situação oposta, este atuará como um indutor. A regulação da tensão é diretamente afetada pela queda de tensão na reatância da linha  $X_L$ , uma vez que a capacidade de regulação da tensão dada pelo STATCOM dependerá da impedância da linha à montante do ponto de acoplamento do equipamento e sua resposta dinâmica será diretamente afetada pelos parâmetros da linha: resistência ( $r_1$ ) e reatância ( $\omega L_1$ ) [ 10 ].

### 3.4.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS INSTANTÂNEAS

A teoria clássica de componentes simétricas [ 14 ] é limitada às análises em regime permanente. A utilização do conceito dos vetores espaciais [ 15 ] estende a aplicação desta

técnica para o caso mais geral de um sistema elétrico desequilibrado em qualquer condição de operação. Assim, para um dado vetor espacial  $w(t)$ , de amplitude  $W$  e variação da posição angular dada por  $\beta(t)$ , temos a seguinte definição:

$$w(t) = W \cdot e^{j(\beta(t))} = W \cdot (\cos(\beta(t)) + j \cdot \sin(\beta(t))) \quad (14)$$

Esta representação pode ser usada para a definição de uma fonte de tensão senoidal, como segue:

$$v(t) = V \cdot \cos(\beta(t)) = \text{Re}(v(\beta(t))) \quad (15)$$

Assim sendo, para um determinado conjunto de fontes de tensão trifásicas desequilibradas dado pelo conjunto de vetores espaciais representados em (16), os valores instantâneos das componentes simétricas das tensões podem ser obtidos a partir da extração da parte real destes vetores espaciais, conforme mostrado em (17), o que permite utilizar o conceito das componentes simétricas, originalmente desenvolvido para análises em regime permanente, nas análises dinâmicas, uma vez que a dependência com o tempo é mantida durante a transformação.

$$v(t)_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \cdot e^{j(\omega t + \phi_a)} \\ V_b \cdot e^{j(\omega t + \phi_b - 120^\circ)} \\ V_c \cdot e^{j(\omega t + \phi_c + 120^\circ)} \end{bmatrix} = e^{j\omega t} \cdot \begin{bmatrix} V_a \cdot e^{j(\phi_a)} \\ V_b \cdot e^{j(\phi_b - 120^\circ)} \\ V_c \cdot e^{j(\phi_c + 120^\circ)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} v(t)_{012} &= A \cdot v(t)_{abc} \\ &= \text{Re} \left( \frac{e^{j\omega t}}{3} \cdot \begin{bmatrix} V_a \cdot e^{j(\phi_a)} + V_b \cdot e^{j(\phi_b - 120^\circ)} + V_c \cdot e^{j(\phi_c + 120^\circ)} \\ V_a \cdot e^{j(\phi_a)} + V_b \cdot e^{j(\phi_b)} + V_c \cdot e^{j(\phi_c)} \\ V_a \cdot e^{j(\phi_a)} + V_b \cdot e^{j(\phi_b + 120^\circ)} + V_c \cdot e^{j(\phi_c - 120^\circ)} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

### 3.4.2. A TRANSFORMAÇÃO PARA O EIXO DE REFERÊNCIA SÍNCRONO EM CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO

Uma vez estando o sistema desequilibrado separado em suas componentes simétricas, torna-se possível a transformação para o referencial síncrono e, assim, desenvolver as análises e o projeto de qualquer aplicação que utilize modelos dinâmicos em corrente contínua, dentre elas o projeto de um compensador desequilibrado. A utilização desta técnica torna-se necessária para a obtenção de um ganho infinito na malha de retro-alimentação, de sorte a ser possível a eliminação das componentes de sequência negativa e zero, o que pode ser alcançado pela utilização de um termo integral.

A representação das grandezas no eixo de referência síncrono tradicional, entretanto, apresenta problemas quando as tensões de fase estão desequilibradas, pois a transformação produzirá sinais de saída que conterão componentes de 2ª harmônica em acréscimo à

componente contínua desejada. Tal efeito pode ser eliminado com uma transformação que projete cada tensão de fase sobre um eixo ortogonal na referência síncrona e, posteriormente, combine os eixos de referência síncrona das tensões de cada fase para obter as componentes de cada uma das seqüências. A **Fig. III.3** demonstra o diagrama de blocos da transformação no eixo de referência síncrona e as equações detalhadas podem ser consultadas no **APÊNDICE A**. A vantagem dessa transformação modificada é a possibilidade de sua utilização tanto em condições de equilíbrio quanto de desequilíbrio de fases, sem qualquer alteração em sua concepção, bem como a facilidade com que as tensões no eixo de referência síncrona são obtidas a partir de simples manipulação algébrica [ 9 ]. A transformação para o eixo de referência síncrono da **Fig. III.3** consiste no deslocamento da tensão de fase no domínio do tempo (*heterodyning*) através do produto com  $-2.\cos(\theta)$  e  $2.\sin(\theta)$  para produzir um sinal contínuo mais um sinal de 2º harmônico. Este último é eliminado pela utilização de um filtro do tipo *Low-Pass Notch* - LPN para obter a projeção das tensões sobre o eixo de referência síncrono. A função de transferência e demais parâmetros de projeto do filtro LPN são dados em [ 16 ]. A vantagem de se utilizar um filtro do tipo LPN é que este promove a completa eliminação do sinal harmônico indesejável ( $\omega_n$ ) e uma forte atenuação de qualquer sinal harmônico de frequência superior, mantendo um ganho elevado para os sinais de frequência inferior à indesejável.

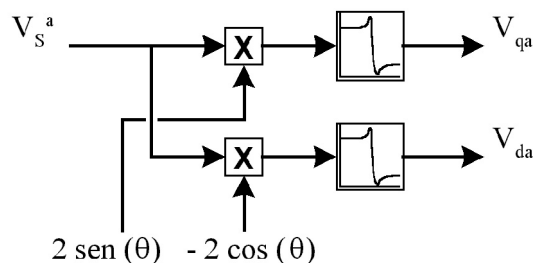


Fig. III.3: Transformação para o eixo de referência síncrono e filtragem por fase.

### 3.4.3. O CONTROLADOR DAS COMPONENTES DE SEQÜÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO

Utilizando a nova transformação, o controlador de tensão no eixo de referência síncrono para o STATCOM é mostrado na **Fig. III.4**. As tensões da rede são amostradas e separadas em suas componentes de seqüência positiva, negativa e zero, sendo cada uma delas com sua magnitude e ângulo de fase controlados a partir de malhas independentes. Na **Fig. III.5**, encontra-se demonstrado o modelo simplificado de simulação do inversor de frequência do STATCOM e a malha de controle da tensão sobre o capacitor. O inversor é representado por um conjunto de fontes de tensão reguladas a partir do sinal de controle

obtido do módulo representado na **Fig. III.4**. O modelo considera que o fluxo da potência em corrente alternada no STATCOM é exatamente igual àquele oriundo da carga e descarga do capacitor do elo de corrente contínua, isto é, o inversor não apresenta perdas, nem elementos armazenadores de energia.

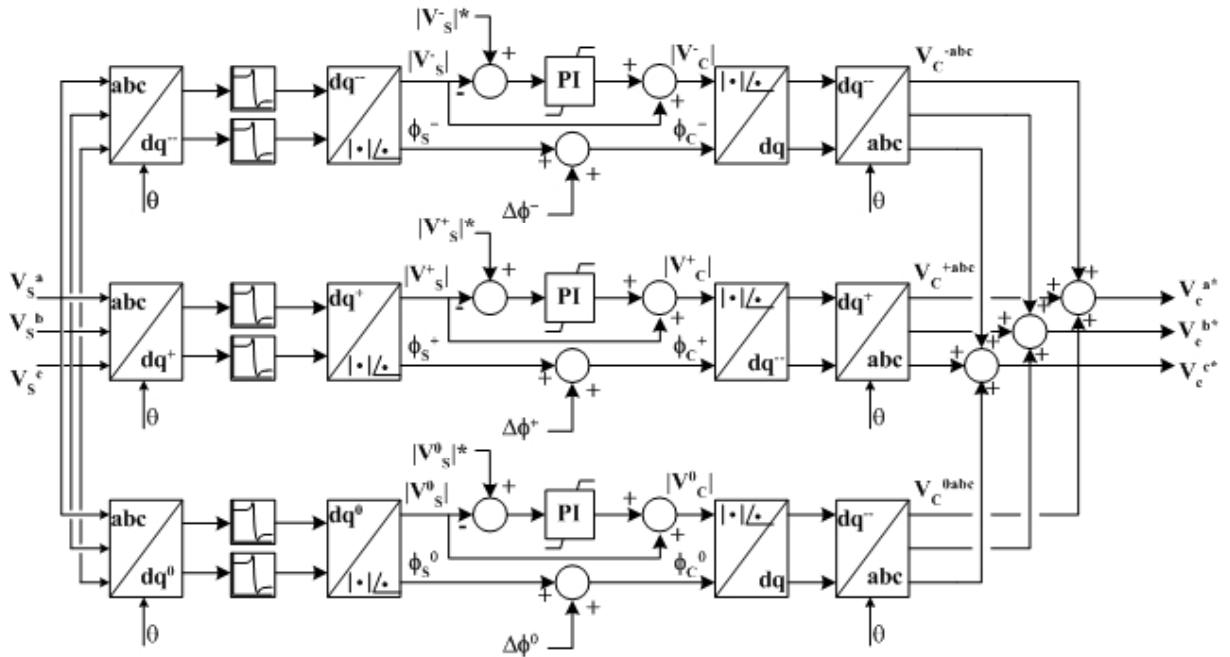


Fig. III.4: Regulador da tensão do STATCOM utilizando malhas de controle separadas para as componentes de sequência positiva, negativa e zero.

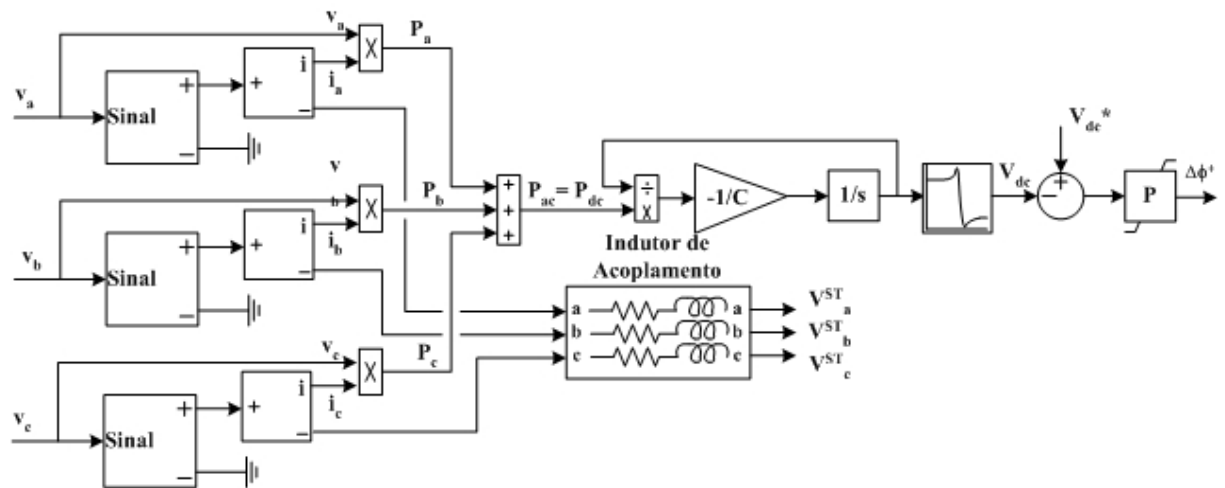


Fig. III.5: Modelo do inversor e malha de controle do elo CC no ambiente MatLab/Simulink.

### 3.4.3.1. Modelagem e Ajuste dos Ganhos

Em [ 10 ], utilizando-se o método do controle direto da tensão e incorporando-se à análise o teorema da superposição, demonstra-se que, a partir do circuito equivalente para o estágio de potência mostrado na **Fig. III.6**, pode-se obter a função de transferência apresentada em (18).

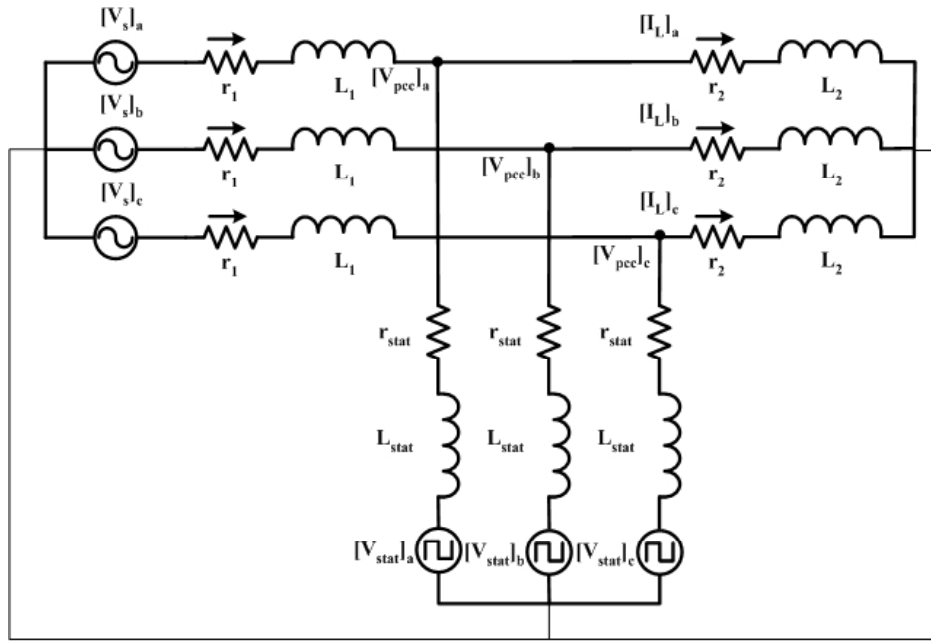


Fig. III.6: Circuito equivalente para a restauração e regulação da tensão.

$$\frac{V_{pcc}(s)}{V_{stat}(s)} = \frac{L_1 L_2 \cdot s^2 + (L_1 r_2 + L_2 r_1) \cdot s + r_1 r_2}{((L_1 + L_2) \cdot L_{stat} + L_1 L_2) \cdot s^2 + ((L_1 + L_2) \cdot r_{stat} + (r_1 + r_2) \cdot L_{stat} + L_1 r_2 + L_2 r_1) \cdot s + (r_1 r_2 + (r_1 + r_2) \cdot r_{stat})} \quad (18)$$

Substituindo-se as incógnitas da expressão pelos parâmetros reais do circuito em análise, conforme mostrado na **Fig. I.2** e transcritos na **Tabela III.1**, obtém-se a equação (19) para a função de transferência da planta. Em [ 10 ] encontra-se, ainda, demonstrado que, para este sistema, a resposta no tempo de seu controle é limitada pela unidade mais lenta, ou seja, pelos blocos de extração das componentes instantâneas  $dq0$  para cada uma das fases, este com atraso em torno de 10 ms. Logo, a resposta geral dos controladores no tempo não excederá 15 ms.

Tabela III.1: Parâmetros do estágio de potência do conjunto inversor-carga.

Grandezas		Valores em p.u. ( $S_{base} = 100 \text{ MVA}$ )	Valores reais
Resistência de linha	$r_1$	6,2297	11,8638 $\Omega$
Reatância de linha	$L_1$	3,0154	15,2328 mH
Resistência de carga	$r_2$	40,00000	76,1760
Reatância de carga	$L_2$	0,07958	151,5000 mH
Resistência de acoplamento	$r_{stat}$	0,83333	1,5870 $\Omega$
Reatância de acoplamento	$L_{stat}$	0,04421	84,2000 mH

$$G_P = \frac{V_{pcc}(s)}{V_{stat}(s)} = \frac{0,002308 \cdot s^2 + 2,957739 \cdot s + 903,736829}{0,016347 \cdot s^2 + 10,635296 \cdot s + 1043,455991} \quad (19)$$

Uma vez determinada a função de transferência da planta em (19), gráficos para uma análise da resposta em frequência, utilizando-se o método do lugar das raízes (*root locus*) e o método de Bode para malha aberta (*Open-loop Bode*), podem ser obtidos a partir da

ferramenta *Sisotool* do *MatLab*. A **Fig. III.7** mostra o gráfico das respostas obtidas para o método do lugar das raízes e a **Fig. III.8**, o gráfico das respostas obtidas pelo método de Bode para malha aberta, onde a resposta em frequência do estágio de potência pode ser tratada, aproximadamente, como um valor dB constante para quase todas as frequências plotadas (com um erro inferior a 2,5 dB) [ 10 ].

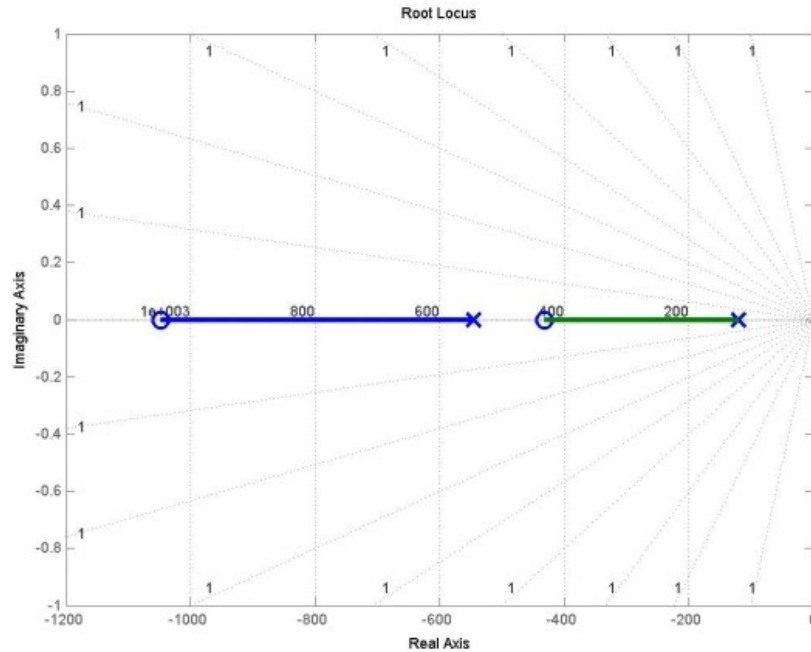


Fig. III.7: Diagrama de pólos e zeros para o estágio de potência do STATCOM.

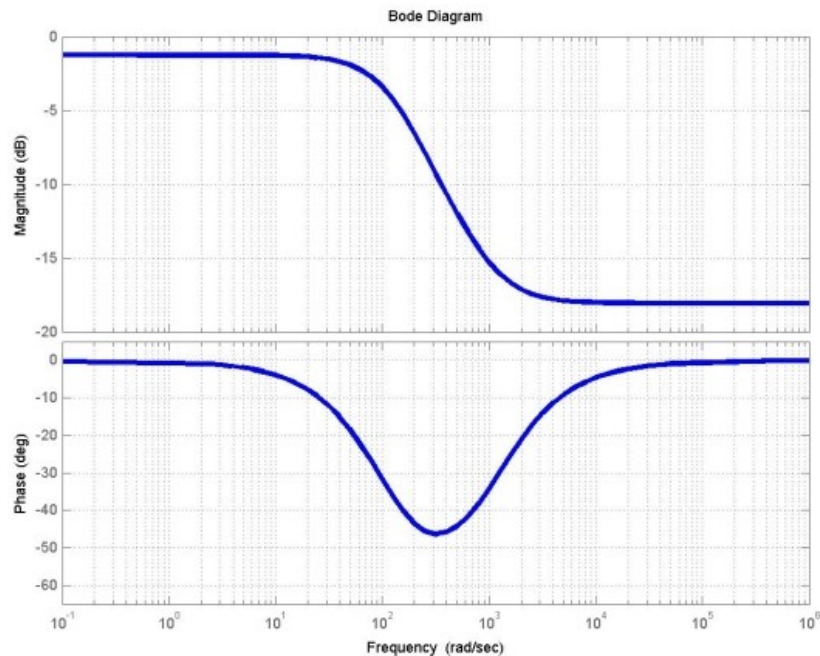


Fig. III.8: Resposta em frequência para o estágio de potência do STATCOM.

Para o controle de tensão proposto em [ 9 ], baseado em três malhas de controle independentes para cada uma das componentes de sequência positiva, negativa e zero, um controlador PI é utilizado para eliminar o erro em regime permanente na malha de controle da

componente de seqüência positiva, sendo o procedimento deste projeto descrito em [ 15 ]. Para as malhas das componentes de seqüência negativa e zero, um procedimento análogo àquele utilizado para a componente positiva pode ser empregado. Entretanto, ressaltam-se as seguintes diferenças: (i) não há regulação do ângulo de fase; (ii) quando o valor destas duas componentes for próximo de zero, seu ângulo de fase oscilará entre  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ , o que requer um sistema de controle com uma resposta bem rápida para regular; (iii) normalmente, seus valores são pequenos e ligeiramente desequilibrados, conforme descrito em [ 10 ]. Assim, a ênfase deste controle é a compensação da componente de seqüência positiva e, por esta razão, um pequeno valor, diferente de zero, é permitido para o erro estático das componentes de seqüência negativa e zero.

Para que o valor dos ganhos  $k_i$  e  $k_p$  do controlador PI utilizado seja determinado com exatidão, torna-se necessário conhecer a interação da função de transferência da planta com os demais elementos do controle: a função de transferência do filtro LPN, utilizado para eliminar a componente de  $2^\circ$  harmônico resultante do *heterodyning* e do próprio controlador PI. A função de transferência do filtro LPN projetado com ganho CC unitário, fator de qualidade de 50%, frequência de transição de 188,5 rad/s (30 Hz) e frequência suprimida (*notch frequency*) de 754 rad/s (120 Hz), é apresentada em (20). A **Fig. III.9** mostra o gráfico das respostas obtidas pelo método do lugar das raízes e a **Fig. III.10**, o gráfico das respostas obtidas pelo método de Bode para malha aberta.

$$H(s) = \frac{0,0625 \cdot s^2 + 3,553 \cdot 10^4}{s^2 + 377 \cdot s + 3,553 \cdot 10^4} \quad (20)$$

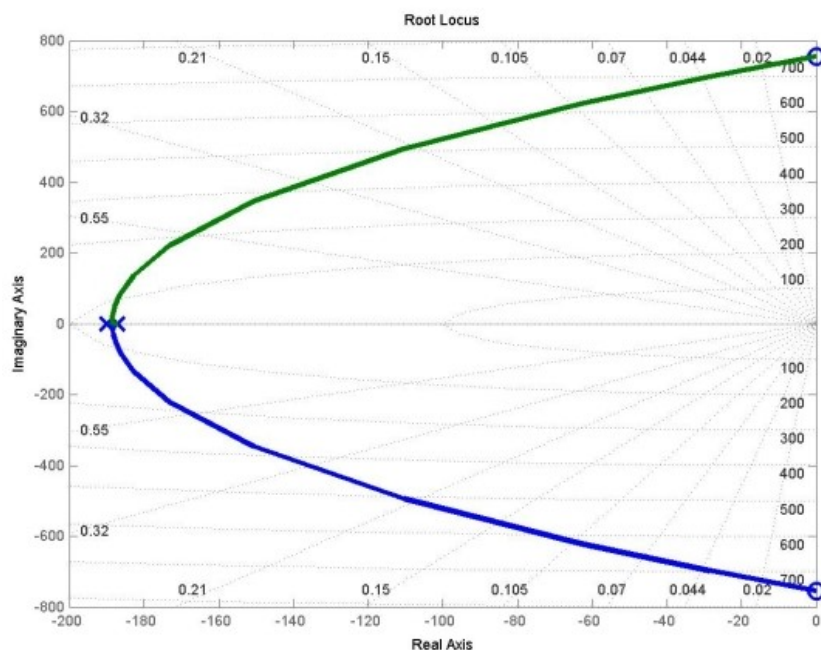


Fig. III.9: Diagrama de pólos e zeros da função de transferência do filtro LPN.



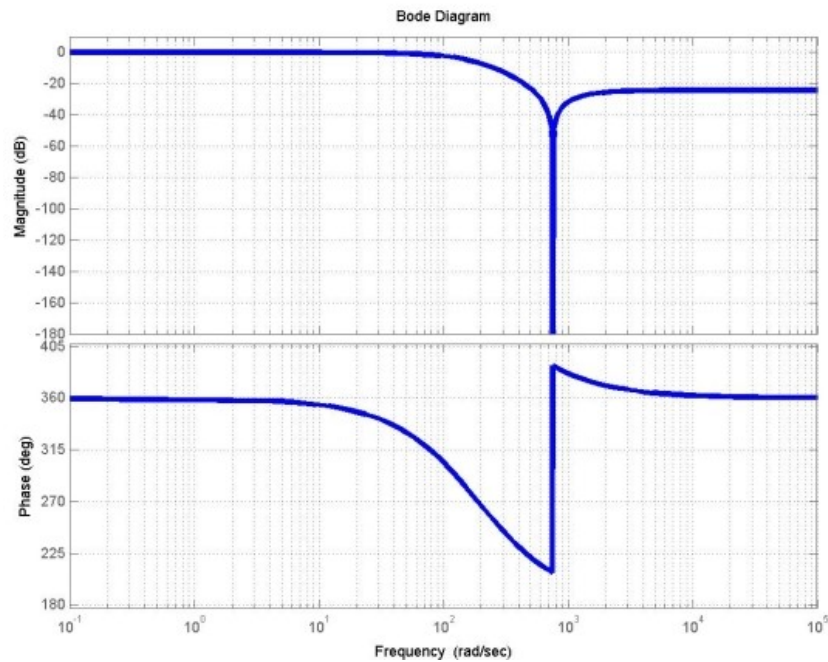


Fig. III.10: Resposta em frequência da função de transferência do filtro LPN.

A interação entre as funções de transferência da planta e do filtro LPN, considerando o modelo de malha apresentado na **Fig. III.11**, onde  $F = 1$ , é demonstrada na **Fig. III.12** na forma de sua resposta em frequência. O controlador PI, de função de transferência do tipo  $C(s) = k_p + k_i/s$ , a ser inserido na malha de controle agregará um pólo e um zero à função de transferência resultante, além de um ganho, tornando-se necessária a correta seleção destes parâmetros, de sorte a não prejudicar a estabilidade da resposta da malha de controle. A **Fig. III.13** apresenta a resposta em frequência para a malha de controle com um controlador PI com a função de transferência  $C(s) = 64,5 \cdot (1 + 0,0095 \cdot s) / s$ , enquanto que a **Fig. III.14** exhibe a sua resposta no tempo ao degrau, onde é possível observar a rapidez da resposta obtida e a sua estabilidade em regime permanente.

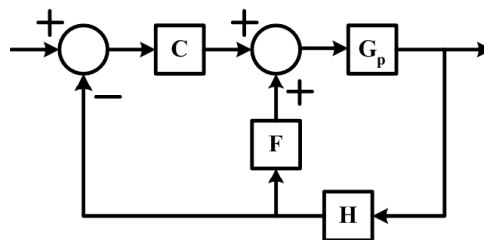


Fig. III.11: Tipo da malha de controle simulada.

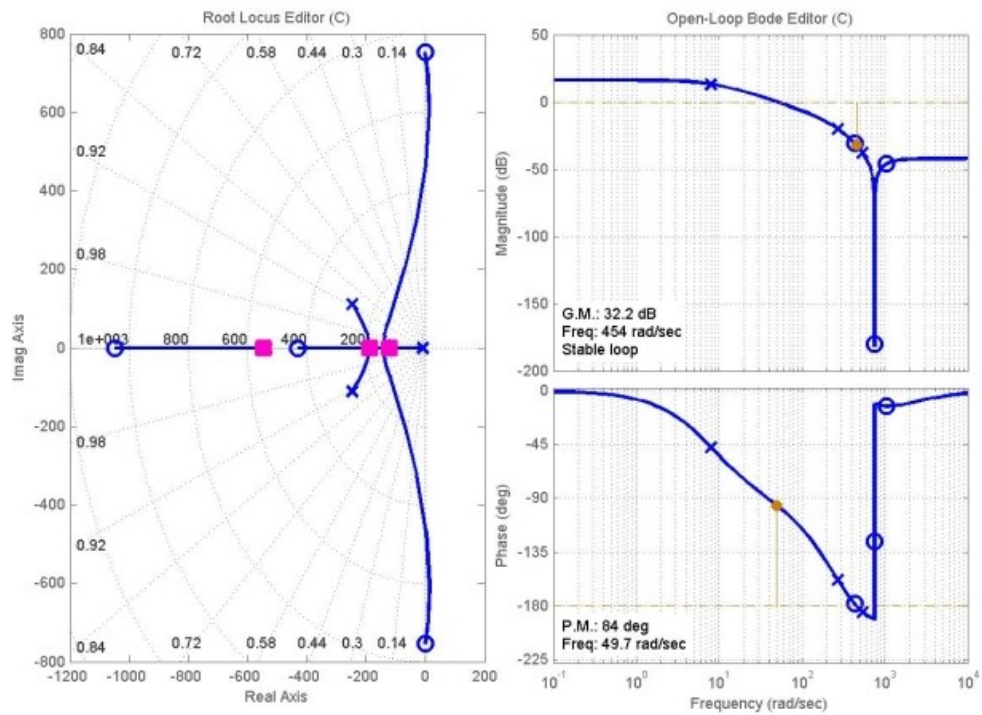


Fig. III.12: Diagrama de pólos e zeros e resposta em frequência para as funções de transferência da planta e do filtro LPN combinadas.

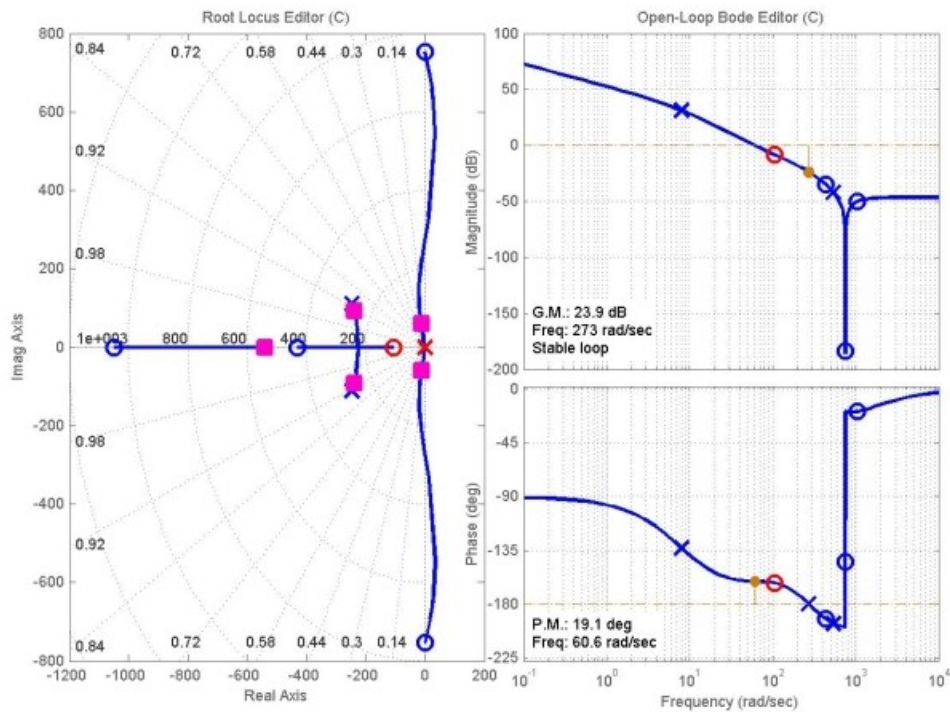


Fig. III.13: Resposta em frequência da malha de controle resultante.

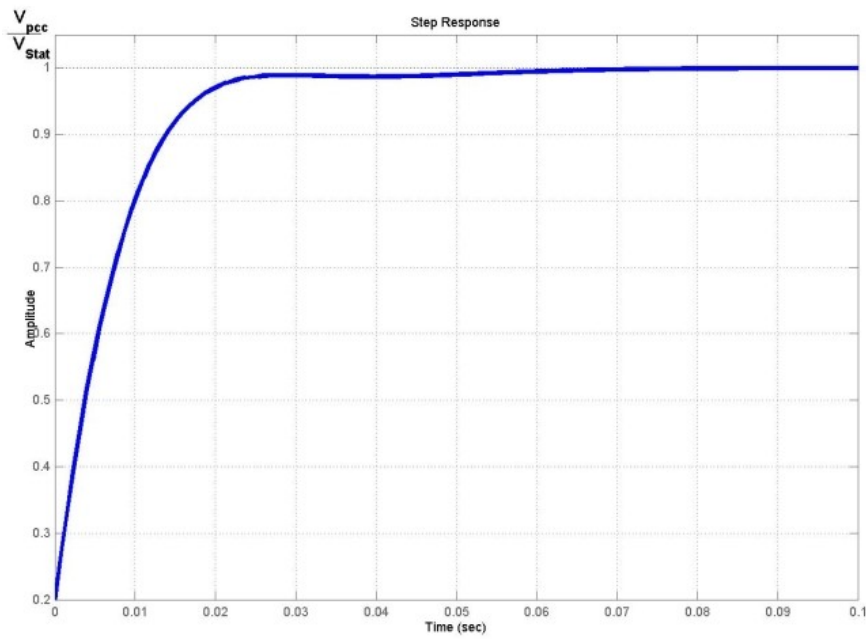


Fig. III.14: Resposta no tempo ao degrau unitário em malha fechada.

#### 3.4.4. O CONTROLADOR DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA

Em [ 9 ], o ângulo da tensão de sequência positiva do inversor é utilizado para controlar a tensão total na sua barra de corrente contínua. Para tanto, a malha de controle da tensão  $V_{dc}$  utiliza um controlador PI para gerar um sinal de referência da potência, o qual é comparado com a potência de sequência positiva atual. O sinal de erro assim obtido alimenta um controlador de ganho proporcional com um saturador para limitá-lo, fornecendo na saída a diferença no ângulo entre a tensão amostrada de sequência positiva do sistema e o ângulo da tensão do inversor. A diferença de ângulo é, então, re-alimentada na malha de controle da componente de sequência positiva como uma referência para ajuste do ângulo de potência do inversor. A **Fig. III.15** apresenta o modelo do controle discutido.

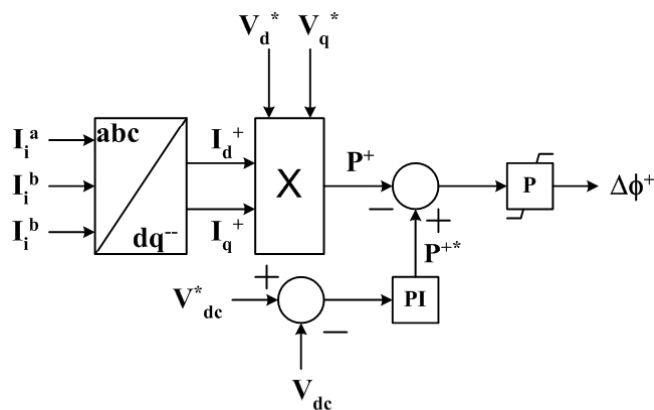


Fig. III.15: Malha de controle do elo de corrente contínua do inversor.

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, percebeu-se que tal esquema de controle da tensão  $V_{dc}$  poderia ser extremamente simplificado, sem qualquer prejuízo à rapidez de resposta, estabilidade ou eficiência do controle geral do STATCOM. A **Fig. III.16** exibe a malha de controle da tensão  $V_{dc}$  utilizada nas simulações desenvolvidas neste estudo.

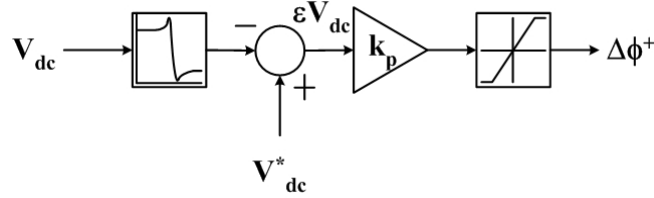


Fig. III.16: Malha de controle simplificada para o elo de corrente contínua do inversor.

#### 3.4.4.1. Linearização do Modelo do Elo de Corrente Contínua do STATCOM

Para um dado ângulo  $\delta$  suficientemente pequeno, este resultado do defasamento angular das tensões nos terminais de saída do STATCOM em relação às tensões no ponto de conexão da carga ( $\delta = \angle V_{ST} - \angle V_{pcc}$ ), pode-se considerar que o  $\sin \delta \approx \delta$ . Assim, a expressão que representa a potência ativa, em corrente alternada, fornecida pelo STATCOM pode ser simplificada conforme descrito na equação (21).

$$P_{ac} = \frac{V_{ST} \cdot V_{pcc}}{X_{ST}} \cdot \sin \delta = \frac{V_{ST} \cdot V_{pcc}}{X_{ST}} \cdot \delta = P_{máx} \cdot \delta \quad (21)$$

Por outro lado, a potência absorvida pelo elo de corrente contínua do inversor pode ser expressa em função da capacitância e da tensão sobre os terminais do capacitor, de acordo com a equação (22), correspondendo, em módulo, à potência ativa em corrente alternada, porém com o sinal trocado ( $P_{dc} = -P_{ac}$ ).

$$P_{dc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \cdot V_{dc} \quad (22)$$

Igualando-se (21) e (22) e separando-se seus termos de forma a explicitarmos  $dV_{dc}/dt$ , o resultado demonstrado em (23) é obtido, através do qual se constata que a derivada da tensão sobre o elo de corrente contínua do inversor é função da própria tensão e do ângulo  $\delta$ .

$$\begin{aligned} P_{dc} &= -P_{ac} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \cdot V_{dc} &= -P_{máx} \cdot \delta \quad \therefore \quad \frac{dV_{dc}}{dt} = \left( -\frac{P_{máx}}{C_{dc}} \right) \cdot \frac{1}{V_{dc}} \cdot \delta = -\frac{k}{V_{dc}} \cdot \delta \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{seja } x = V_{dc} \text{ e } k = \frac{P_{máx}}{C_{dc}} > 0 \quad \therefore \quad \dot{x} = -\frac{k}{x} \cdot \delta \quad \therefore \quad \dot{x} = f(x, \delta)$$

Aplicando-se a teoria de tratamento de pequenos sinais à expressão obtida para  $dV_{dc}/dt$  em (23), obtém-se o resultado demonstrado em (24).

$$\Delta \dot{x} = \left. \frac{\partial f(x, \delta)}{\partial x} \right|_{V_{dc0}, \delta_0} \cdot \Delta x + \left. \frac{\partial f(x, \delta)}{\partial \delta} \right|_{\delta_0, V_{dc0}} \cdot \Delta \delta$$

$$\Delta \dot{x} = \frac{k}{x_0^2} \cdot \delta_0 \cdot \Delta x - \frac{k}{x_0} \cdot \Delta \delta$$
(24)

Reescrevendo a expressão obtida em (24) na forma de uma equação Laplaciana, tem-se a função de transferência apresentada em (25).

$$s \cdot \Delta x(s) = \frac{k}{x_0^2} \cdot \delta_0 \cdot \Delta x(s) - \frac{k}{x_0} \cdot \Delta \delta(s)$$

$$\Delta x(s) \cdot \left( s - \frac{k}{x_0^2} \cdot \delta_0 \right) = -\frac{k}{x_0} \cdot \Delta \delta(s)$$
(25)

$$\frac{\Delta x(s)}{\Delta \delta(s)} = -\frac{k/x_0}{s - \delta_0 \cdot k/x_0^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta V_{dc}(s)}{\Delta \delta(s)} = -\frac{k/V_{dc}}{s - \delta_0 \cdot k/V_{dc}^2}$$

A expressão (25) permite observar que para o caso  $\delta_0 = 0$ , o modelo terá um pólo na origem. Porém, na prática  $\delta_0 \neq 0$ , embora seja pequeno, fazendo com que o sistema possua um pólo no semi-plano direito quando  $\delta_0 > 0$ . Em regime, no caso prático, o fluxo de  $P_{ac}$  é do PCC para o inversor, de sorte que  $P_{ac}(0) < 0$  e  $\delta_0 < 0$ . A **Fig. III.17** apresenta os parâmetros e convenções utilizados na presente análise.

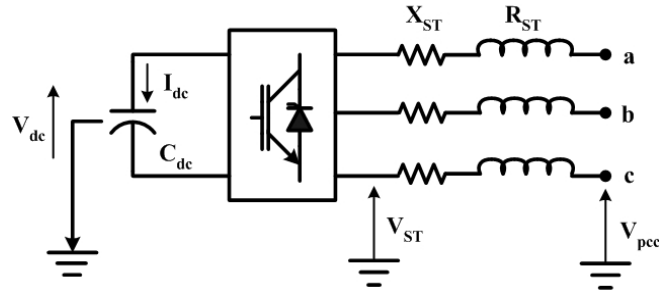


Fig. III.17: Parâmetros do STATCOM.

#### 3.4.4.2. Modelagem e Ajuste dos Ganhos

De maneira análoga ao procedimento utilizado para a determinação dos ganhos do controlador das componentes de sequência positiva, negativa e zero, o ganho  $k_p$  do controlador da tensão do elo de corrente contínua foi determinado com o auxílio da ferramenta *Sisotool* do *MatLab* para análise da resposta em frequência e do lugar das raízes da função de transferência resultante do conjunto: filtro LPN + planta + controlador. A **Fig. III.18** mostra a resposta em frequência obtida e o lugar dos pólos e zeros da malha.

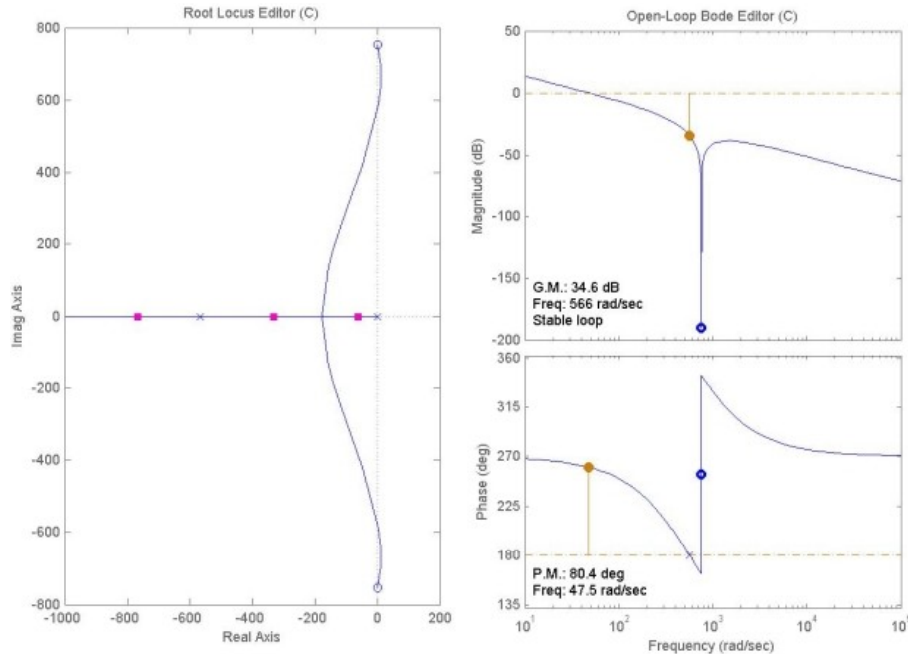


Fig. III.18: Resposta em frequência da malha de controle da tensão do elo de corrente contínua do STATCOM.

A função de transferência da planta (elo de corrente contínua do STATCOM) é dada pela expressão (26), enquanto que as funções de transferência do filtro LPN e do controlador são apresentadas em (27) e (28), respectivamente.

$$G_{dc}(s) = -\frac{P_{m\acute{a}x}}{X_{ST} \cdot V_{dc} \cdot C_{dc} \cdot s} = \frac{3 \cdot V_S \cdot V_{PCC}}{X_{ST}} \cdot \frac{1}{V_{dc}} \cdot \frac{-1}{C_{dc} \cdot s} \quad (26)$$

$$H(s) = \frac{0,05626 \cdot s^2 + 3,198 \cdot 10^5}{s^2 + 1131 \cdot s + 3,198 \cdot 10^5} \quad (27)$$

$$C(s) = k_p = -0,001 \quad (28)$$

Os parâmetros de projeto estabelecidos para o filtro LPN da malha de controle da tensão do elo de corrente contínua do STATCOM foram:

- Frequência de corte ( $w_n$ ): 754 rad/s (120 Hz)
- Frequência de transição ( $w_o$ ): 565,5 rad/s (90 Hz)
- Fator de Qualidade (FQ): 50%
- Ganho em corrente contínua ( $k_{dc}$ ): unitário

Os parâmetros estabelecidos para a planta foram:

- Tensão de pico fase-neutro da fonte ( $V_S$ ): 11.265,67 Volts
- Tensão de pico fase-neutro no PCC ( $V_{PCC}$ ): 11.265,67 Volts
- Capacitância do elo de corrente contínua ( $C_{dc}$ ): 10 mF
- Tensão nominal sobre o elo de corrente contínua ( $V_{dc}$ ): 25.000 Volts
- Reatância de acoplamento do STATCOM por fase ( $X_{ST}$ ): 31,74  $\Omega$

O gráfico da resposta no tempo a uma perturbação em degrau unitário para a função de transferência discriminada em (26) é dado na **Fig. III.19**.

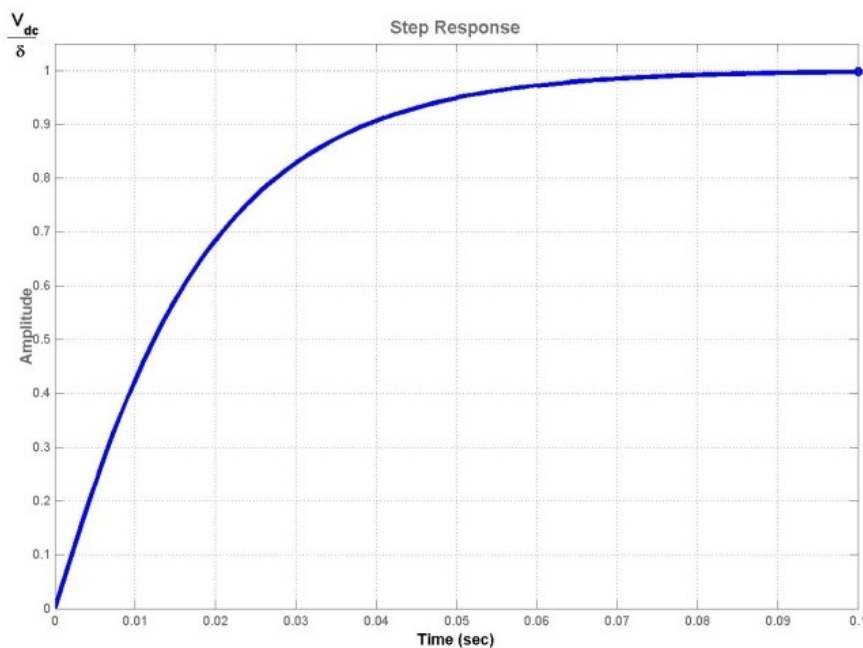


Fig. III.19: Resposta no tempo da malha de controle do elo CC do STATCOM a uma perturbação em degrau unitário.

### 3.5. CONCLUSÕES

No CAPÍTULO III , foram apresentados os modelos desenvolvidos para a rede de distribuição, para os bancos de capacitores, para o regulador de tensão, para o STATCOM e para suas malhas de controle das componentes de seqüência positiva, negativa e zero e do elo de corrente contínua do inversor, bem como as premissas utilizadas na determinação de seus parâmetros, na inicialização dos modelos e de seu comportamento para fins de simulação. Introduziu-se, ainda, neste capítulo, o conceito das componentes simétricas instantâneas o qual permite estender a utilização da teoria clássica de componentes simétricas, aplicável originalmente às análises em regime permanente, às análises dinâmicas. Por fim, apresentou-se a modelagem e o ajuste dos ganhos das malhas de controle das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, bem como da malha do elo de corrente contínua do inversor de freqüência do STATCOM, com as suas respectivas funções de transferência, gráficos do lugar de suas raízes e as suas respostas em freqüência e à uma perturbação em degrau, demonstrando a estabilidade alcançada para o sistema e a sua rapidez de atuação.

## CAPÍTULO IV

### ESTUDO DE SIMULAÇÃO

Para uma melhor análise das condições técnicas de fornecimento devidamente relatadas no CAPÍTULO I , optou-se pela sua discretização em cenários que permitam identificar as características mais relevantes para o estudo do problema. Assim, o primeiro cenário base contempla a simulação do alimentador com tensões equilibradas, atendendo cargas trifásicas também equilibradas. Os dispositivos de mitigação existentes no circuito real são, então, desconsiderados, de sorte a permitir a identificação da severidade das condições de atendimento à carga em termos de afundamento da tensão de fornecimento. Este cenário retrata, portanto, o ponto de partida para as demais análises, no transcurso das quais:

- agrega-se ao primeiro cenário base as soluções convencionais para a regulação e mitigação do afundamento da tensão em regime permanente, analisando a sua contribuição para com a normalização do circuito e das condições de fornecimento de energia elétrica dentro dos limites e tolerâncias impostos pela legislação vigente;
- substitui-se, em seguida, o banco regulador de tensão pelo STATCOM; e
- por fim, uma vez conhecida a contribuição de cada tecnologia na mitigação do problema, simula-se a sua associação para análise de uma eventual operação em regime complementar.

Outros cenários são propostos na seqüência, incorporando à análise o desequilíbrio de carregamento entre as fases do alimentador, de sorte a estudarmos a interação dos dispositivos convencionais de regulação da tensão de fornecimento e de reequilíbrio de carregamento entre fases, notadamente os bancos de capacitores e de reguladores de tensão, em relação ao STATCOM, e vice-versa. Nestes cenários, analisa-se, ainda, a atuação do STATCOM em relação à alimentação de cargas monofásicas desequilibradas em um sistema elétrico com seu desempenho já deteriorado. A **Tabela IV.1** apresenta uma síntese dos cenários simulados, estes identificados com o tópico ao qual se referem e a **Tabela IV.2** exhibe os tempos de inicialização do modelo de cada equipamento na simulação, a partir do tempo 0.0 segundo, e o tempo para que o sistema alcance o regime permanente após a perturbação. O ponto de instalação de cada equipamento à rede em cada um dos cenários simulado é aquele apresentado na **Fig. I.2**.



Tabela IV.1: Detalhamento dos cenários simulados.

Cenários	Condições da Rede	Carga Alimentada	Equipamentos Presentes		
			BC	RT	STATCOM
1	Trifásica Equilibrada à montante do PCC	Trifásica Equilibrada à jusante do PCC	Não	Não	Não
1.A			3 x 600kVAr	3 x 1 x 219A	Não
1.B			Não	Não	1 x 600kVAr
1.C			3 x 600kVAr	3 x 1 x 219A	1 x 600kVAr
2	Trifásica Desequilibrada à montante do PCC	Trifásica Equilibrada à jusante do PCC	Não	Não	Não
2.A			3 x 600kVAr	3 x 1 x 219A	Não
2.B			3 x 600kVAr	Não	1 x 600kVAr
2.C			3 x 600kVAr	3 x 1 x 219A	1 x 600kVAr
3.A	Trifásica Desequilibrada à montante do PCC	Trifásica Desequilibrada à jusante do PCC (Análise dinâmica do chaveamento)	3 x 600kVAr	3 x 1 x 219A	Não
3.B			3 x 600kVAr	Não	1 x 600kVAr
3.C			3 x 600kVAr	3 x 1 x 219A	1 x 600kVAr e 1 x 1.200kVAr

Tabela IV.2: Tempos de habilitação dos equipamentos.

Equipamento		Estado Inicial*	Forma de Inicialização	Momento da Ativação	Regime Permanente
BC		1	Em regime	0 ms	0 ms
RT		0	Em rampa c/ inclinação ( <i>slope</i> ) de 100	20 ms	120 ms
STATCOM	Disjuntor de Acoplamento	0	Em degrau unitário	50 ms	75 ms
	Habilitação da Malha de Controle da Tensão do Elo CC ( $V_{dc}$ )	0	Em degrau unitário	75 ms	180 ms
	Habilitação da Malha de Controle das Componentes de Seq. 012	0	Em degrau unitário	180 ms	300 ms

\* Onde: 1 = Ativado; 0 = Desativado/ Sem efeito na simulação

#### 4.1. 1º CENÁRIO BASE: SUBTENSÃO SUSTENTADA EM SISTEMA TRIFÁSICO EQUILIBRADO SEM COMPENSAÇÃO

O cenário base para a análise consiste de um sistema trifásico equilibrado, alimentando uma carga trifásica equilibrada de tal magnitude que resulte em um severo afundamento de tensão, sem que qualquer dispositivo de mitigação seja utilizado. A **Fig. IV.1** nos mostra os valores instantâneos das tensões fase-neutro e das correntes de fase, bem como o valor eficaz da tensão da fase A em relação ao neutro e da sua corrente:

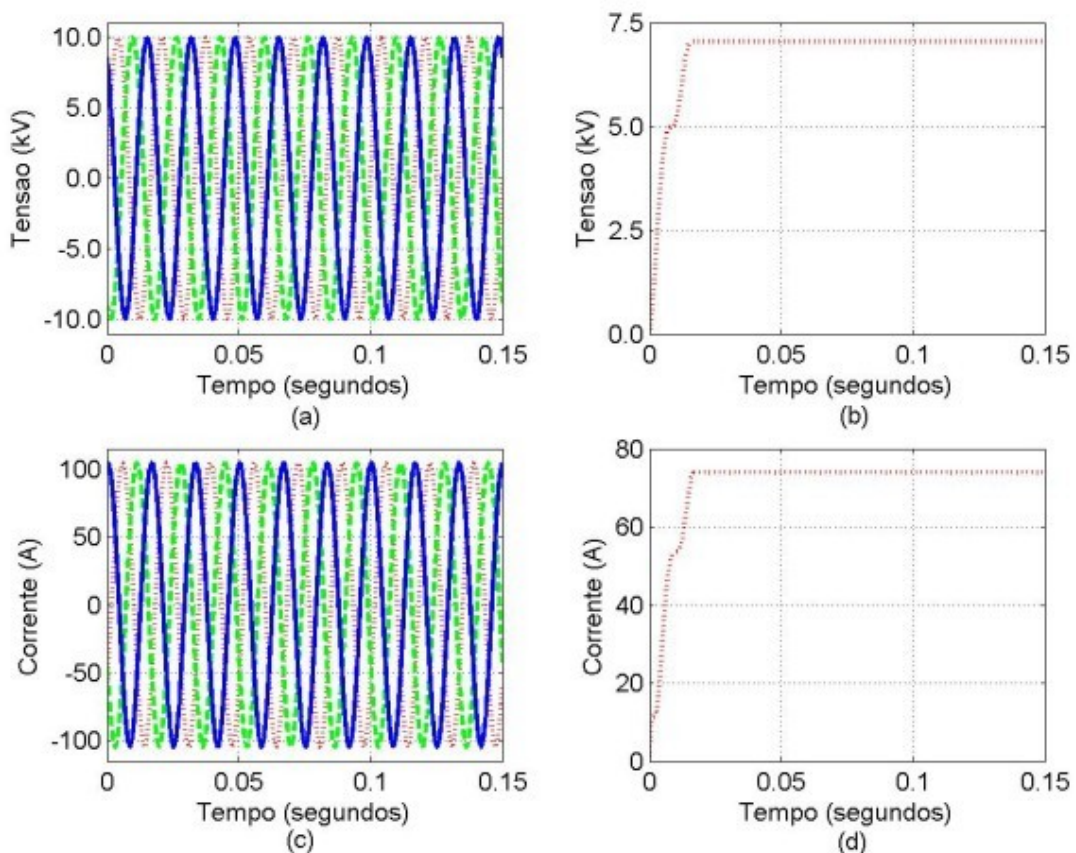


Fig. IV.1: Valor eficaz e instantâneo da tensão fase-neutro e corrente de fase fornecidas pela rede no PCC.

- (a) Valor instantâneo das tensões de fase; (b) Valor eficaz da tensão de fase-neutro da fase A;  
 (c) Valor instantâneo das correntes de fase; (d) Valor eficaz da corrente de fase-neutro da fase A.

A tensão nominal eficaz entre-fases do circuito em análise é de 13,8 kV, ou seja, a tensão eficaz de fase-neutro fornecida pela fonte no PCC é de 7.967 Volts (1,0 p.u.), o que resulta em um valor nominal de pico para a forma de onda instantânea da tensão de 11.267,65 Volts (1,0 p.u.). Como pode ser observado, o valor eficaz da tensão fase-neutro no presente cenário é de 7.040 Volts (0,884 p.u.), verificando-se, portanto, um afundamento sustentado nas tensões da ordem de 11,6%, aproximadamente. Tanto as tensões, quanto as correntes em cada uma das fases encontram-se perfeitamente equilibradas. O pequeno atraso de 20 ms

observado no gráfico dos valores eficazes (rms) da tensão e da corrente é devido à função utilizada para a sua extração no algoritmo da simulação.

#### 4.1.1. CENÁRIO A: APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

O primeiro cenário da análise considera a adoção das técnicas clássicas para a regulação da tensão, acrescentando, portanto, ao cenário base os bancos de capacitores trifásicos e os bancos de reguladores de tensão monofásicos ligados em estrela-aterrada nos respectivos pontos de instalação discriminados na **Fig. I.2**. Para uma maior aproximação entre a simulação com a situação real do alimentador, um banco regulador de tensão e três bancos de capacitores de 600 kVAr, instalados em pontos distintos ao longo do circuito, foram então considerados. A **Fig. IV.2** abaixo exibe os valores eficazes da tensão e da corrente da fase A, fornecidos pela fonte, amostrados no ponto de conexão da carga.

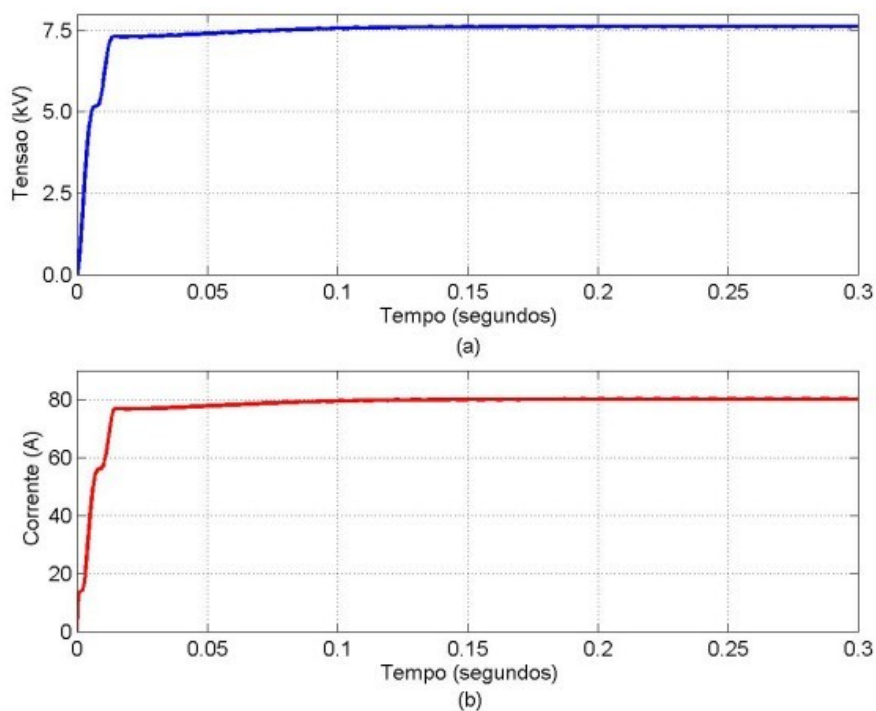


Fig. IV.2: Valores eficazes da tensão fase-neutro e da corrente na fase A

Com a inserção dos dispositivos supracitados, observa-se um incremento na tensão de fornecimento amostrada no ponto de conexão da carga em relação à **Fig. IV.1**. A simulação do cenário inicia-se com os bancos de capacitores já em regime permanente, enquanto que o modelo do regulador de tensão é habilitado após 20 ms. O emprego dos bancos de capacitores elevou o valor eficaz da tensão de fase-neutro fornecida pela fonte no PCC para 7.320 Volts (0,929 p.u.), enquanto que o regulador de tensão levou-a deste patamar para 7.630 Volts

(0,958 p.u.). O crescimento em rampa do valor eficaz da tensão observado no intervalo de 20 a 120 ms deve-se à forma como foi modelado o controle do regulador de tensão (com habilitação em rampa), de sorte a simular uma comutação de *tap*, ainda que este processo ocorra em um intervalo de tempo bastante reduzido em relação ao que se verifica na prática, o que foi realizado apenas com o objetivo de compatibilização da sua forma de atuação com os tempos de simulação. Assim, tem-se que o ganho proporcionado pela inserção dos bancos de capacitores e do regulador de tensão no sistema em estudo é da ordem de 600 Volts na tensão eficaz, no ponto de conexão da carga. Juntamente com a elevação da tensão observa-se um incremento correspondente na corrente, este na ordem de 6A. Este fenômeno, contrário à uma primeira percepção na qual uma elevação da tensão corresponderia a um decrescimento da corrente<sup>5</sup>, é devido à forma como a carga alimentada pelo circuito foi modelada (impedância constante – potência variável)<sup>6</sup>. O comportamento das grandezas elétricas amostradas no regulador de tensão é dado pela **Fig. IV.3**.

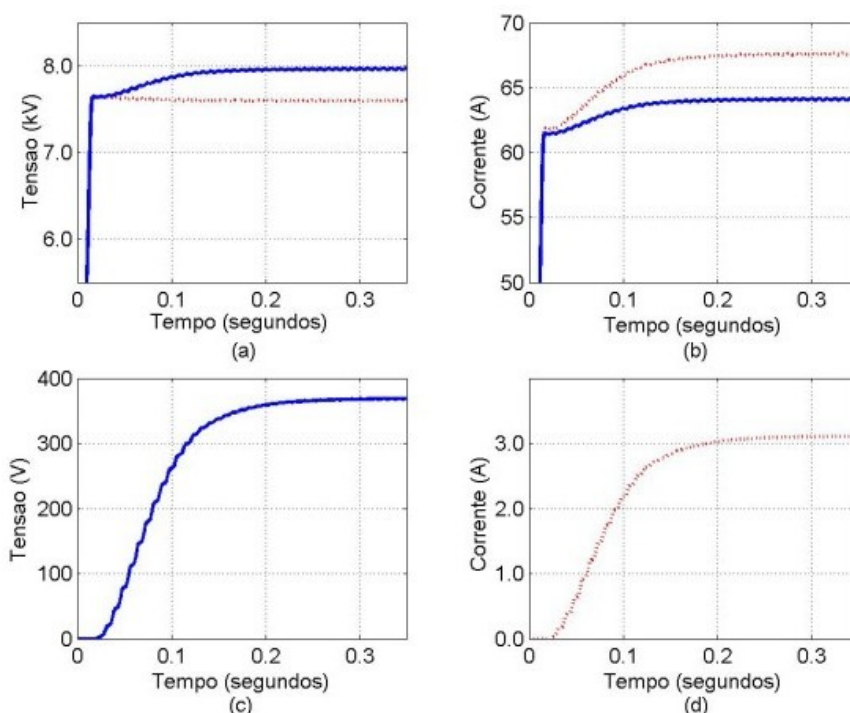


Fig. IV.3: Valores eficazes das grandezas elétricas do Regulador de Tensão – Fase A

(a) Tensão Fase-Neutro nos terminais primário e secundário; (b) Corrente de Linha nos terminais primário e secundário; (c) Tensão induzida nos enrolamentos do auto-transformador por acoplamento magnético; (d) corrente na sua bobina comum.

<sup>5</sup> Esta percepção se aplica às cargas onde a potência requerida seja constante, notadamente os motores de indução.

<sup>6</sup> A prática demonstra que em sistemas de distribuição de média tensão, mesmo aqueles atendendo a uma grande quantidade de motores de indução, o comportamento das cargas obedecerá a formulação ora proposta (ou seja, impedância constante/ potência variável), de sorte variações na tensão de fornecimento implicarão em variações na potência transmitida pelo circuito. Esta abordagem foi validada durante o último período de racionamento de energia elétrica (2001/2002) no Brasil, quando as concessionárias de distribuição foram orientadas a reduzir os níveis das suas tensões de fornecimento em 5% pela Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica - GCE como forma para reduzir o consumo de energia elétrica em sua área de concessão.

A **Fig. IV.3 (a)** exibe os valores eficazes da tensão fase-neutro amostrada em seus terminais primário (vermelho pontilhado) e secundário (azul sólido), demonstrando que o equipamento foi eficaz na elevação da tensão. No terminal primário esta apresenta-se abaixo da tensão nominal de 7967 Volts, enquanto que em seu terminal secundário este valor é alcançado. Por outro lado, a **Fig. IV.3 (b)** exibe uma característica desfavorável do regulador de tensão convencional, a elevação da corrente no terminal primário, ou seja, para corrigir o afundamento de tensão à jusante, o dispositivo aumenta, ainda mais, a queda de tensão e, conseqüentemente, as perdas elétricas à montante. A **Fig. IV.3 (c)** e a **Fig. IV.3 (d)** mostram a tensão induzida nos enrolamentos do auto-transformador por acoplamento magnético e a corrente na sua bobina comum, respectivamente.

#### 4.1.2. CENÁRIO B: O STATCOM X AS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

Uma vez conhecidos os benefícios e malefícios advindos da utilização dos dispositivos tradicionais de mitigação do afundamento da tensão de fornecimento, os resultados do STATCOM no sistema elétrico sob análise podem ser comparados com aqueles anteriormente obtidos. Desta feita, os bancos de capacitores e reguladores de tensão foram eliminados da simulação. A **Fig. IV.4** nos mostra os valores eficazes das tensão fase-neutro e corrente requerida da rede na fase A amostrada no PCC. Como o sistema é inteiramente equilibrado, os mesmos valores de corrente e tensão são encontrados nas fases B e C. O paralelo do STATCOM com a rede é fechado em 50 ms, enquanto que a malha de controle do elo CC é ativada em 75ms e a atuação do dispositivo na regulação das tensões é iniciada em 180 ms, evitando-se, assim, que eventual transitório desestabilize ou comprometa a simulação. A capacidade do STATCOM é de 600 kVAr, correspondendo esta a cerca de 30% da potência aparente da carga alimentada. A utilização deste dispositivo, como pode ser observado, resulta em uma elevação de 160 Volts (2%) no valor eficaz das tensões de fase-neutro e uma redução de 10,5 A (12,5%<sup>7</sup>) nos valores eficazes das correntes de fase requeridas da rede no PCC. A pequena flutuação observada no valor eficaz das correntes de fase é devida às trocas de potência do elo CC do STATCOM com a rede, uma vez que a planta, sendo não-linear, com a mudança das condições de operação, como por exemplo uma variação no carregamento da rede, terá o seu comportamento dinâmico alterado. Considerando a severidade do problema a ser mitigado, a limitação de potência imposta ao equipamento e a ausência de qualquer outro dispositivo de mitigação, os resultados alcançados não podem ser considerados desprezíveis.

---

<sup>7</sup>  $S_{base} = 2 \text{ MVA} \Rightarrow I_{base} = 83,67 \text{ A}$

Não se deve perder de foco o fato do STATCOM ter uma capacidade de 600 kVAr, enquanto que os bancos de capacitores que foram suprimidos do cenário totalizam 1.800 kVAr. A **Fig. IV.5** apresenta a corrente requerida pela carga (vermelho pontilhado), a corrente fornecida pela rede (verde tracejado) e a corrente nos terminais do STATCOM, assinalando a sua contribuição para com o sistema, enquanto que a **Fig. IV.6** exhibe os sinais de controle da componente de seqüência positiva, na qual se verifica a sua saturação no limite superior de 1126,7 Volts.

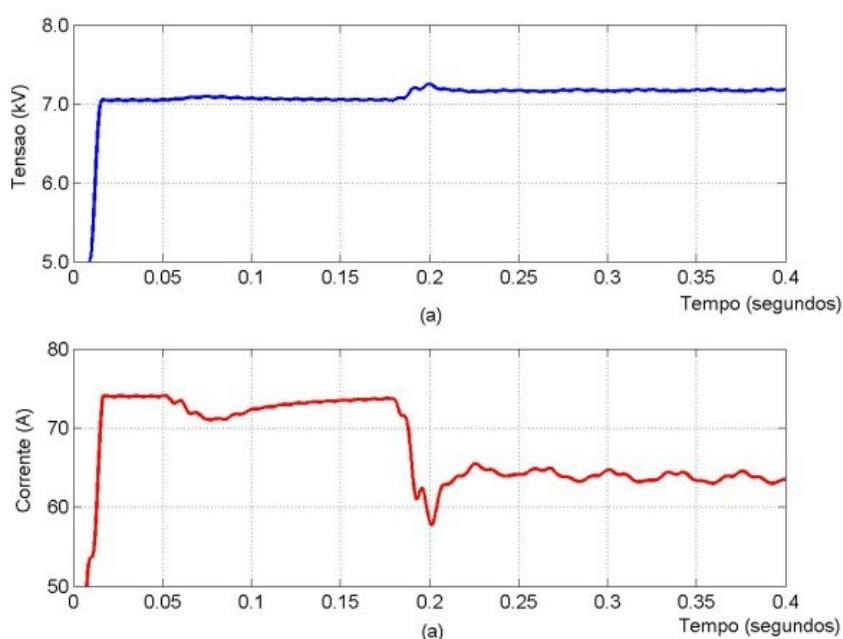


Fig. IV.4: Valor eficaz das tensões fase-neutro e das correntes de fase A, B e C no PCC.

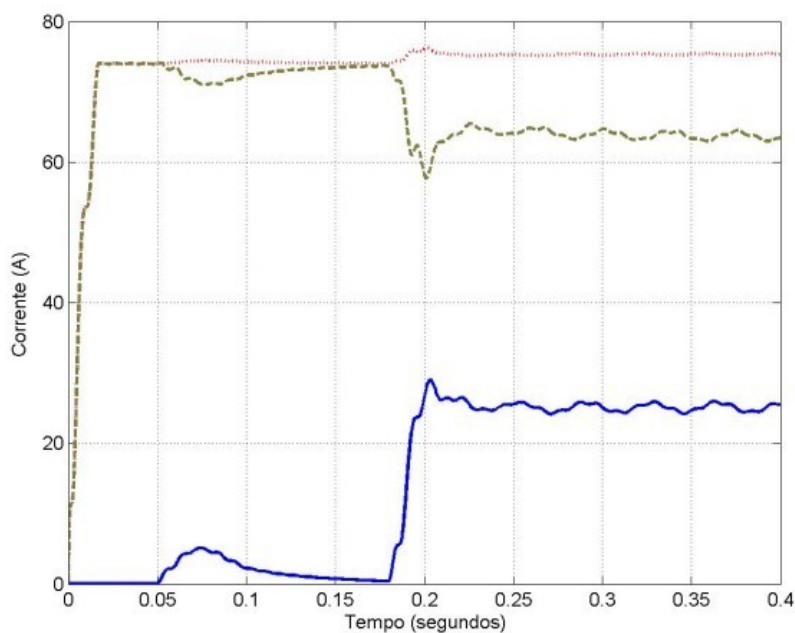


Fig. IV.5: Valores eficazes das correntes A, B e C no PCC.  
 Linha vermelho-pontilhado: corrente requerida pela carga;  
 Linha azul-sólido: corrente nos terminais do STATCOM;  
 Linha verde-tracejado: corrente fornecida pela rede.



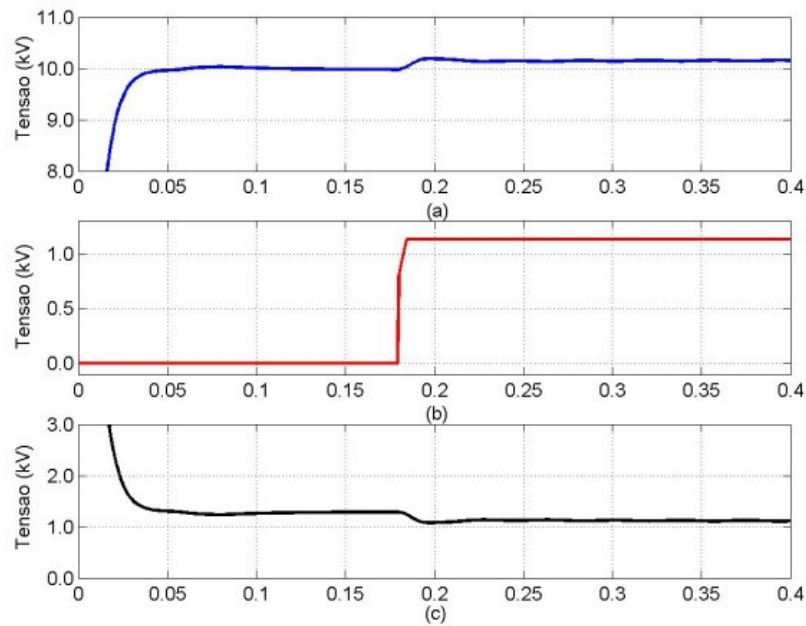


Fig. IV.6: Malha de controle da componente de sequência positiva.  
 (a) Sinal de Entrada; (b) Sinal de Erro; (c) Sinal de Controle.

Por fim, a **Fig. IV.7** mostra o sinal de erro da tensão no elo CC do STATCOM, praticamente nulo (o valor é desprezível em relação à tensão nominal da malha do elo de corrente contínua de 25.000 Volts), e a variação do seu ângulo de potência estabilizada em torno de 0.0275 radianos.

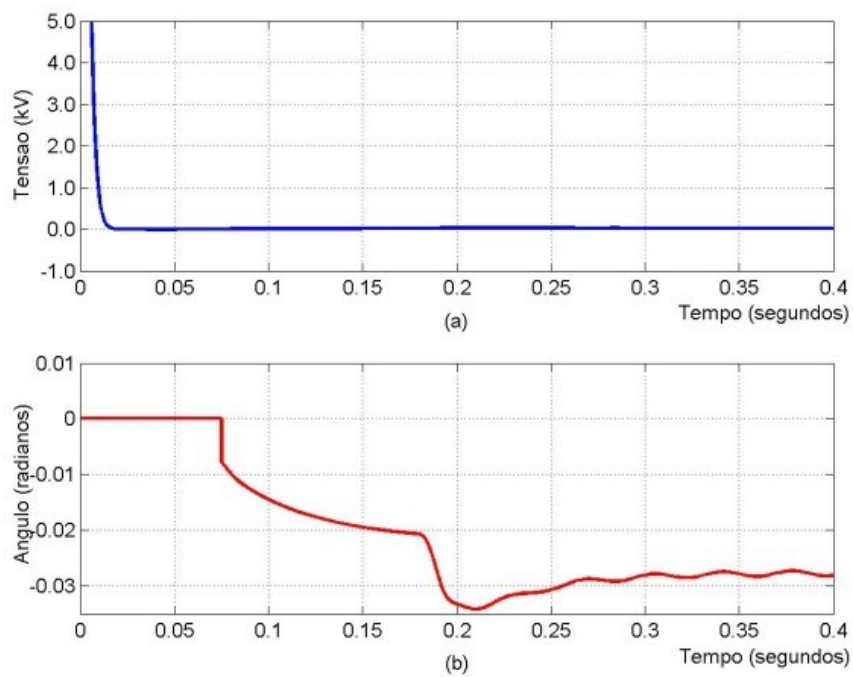


Fig. IV.7: Malha de Controle do Elo CC.  
 (a) Sinal de Erro da Tensão; (b) Variação do ângulo de potência ( $\Delta\phi$ ) do STATCOM.

### 4.1.3. CENÁRIO C: O STATCOM ASSOCIADO ÀS DEMAIS TÉCNICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

Em uma última análise, pode-se, ainda, comparar os resultados anteriormente obtidos nos ítems 4.1.1 e 4.1.2 com aqueles oriundos da utilização de ambas tecnologias de regulação da tensão em uma condição de complementaridade. Assim, de forma análoga ao anteriormente apresentado, a **Fig. IV.8** nos exhibe o valor eficaz das tensões fase-neutro no PCC estabilizado em 7.650 V (0,960 p.u.) e das correntes requeridas da rede pela carga estabilizada em 68,5 A (0,819 p.u.). O nível de tensão então alcançado após a regulação é ligeiramente superior àquele obtido com a utilização apenas dos bancos de capacitores e do regulador de tensão. Entretanto, a corrente requerida da rede pela carga é, significativamente, inferior, implicando, portanto, em menores perdas elétricas no sistema.

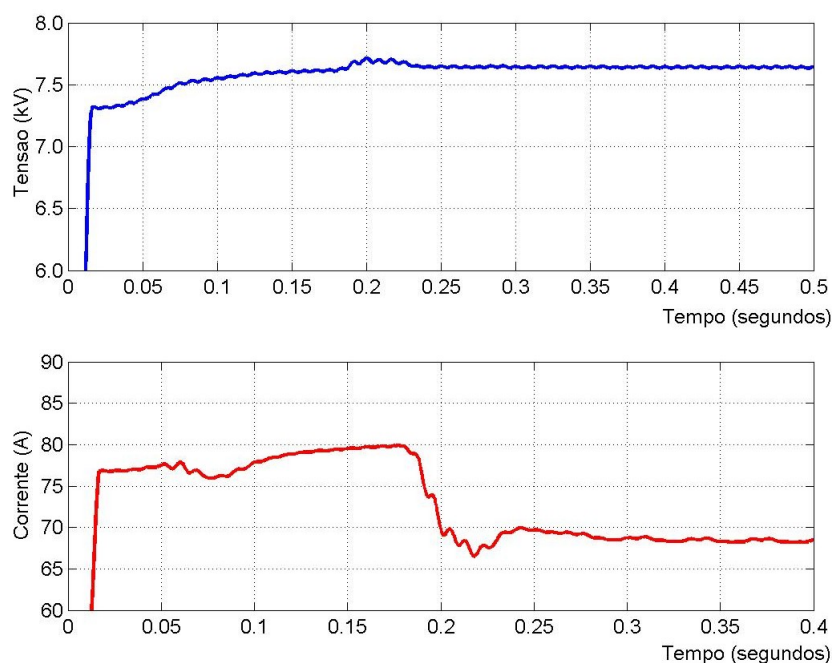


Fig. IV.8: Valor eficaz das tensões fase-neutro e das correntes A, B e C da rede no PCC

A **Fig. IV.9 (a)** exhibe o valor eficaz das tensões de fase nos terminais do STATCOM (azul-sólido), antes do indutor de acoplamento, e das tensões de fase amostradas no PCC (vermelho-pontilhado), enquanto que a **Fig. IV.9 (b)** apresenta o valor eficaz das correntes de carga (vermelho-pontilhado), das correntes fornecidas pelo STATCOM (verde-tracejado) e das correntes requeridas da rede pela carga (azul-sólido), também amostradas no PCC. O valor eficaz da tensão fase-neutro nos terminais do STATCOM é de 8.440 V (1,059 p.u.) no regime permanente.



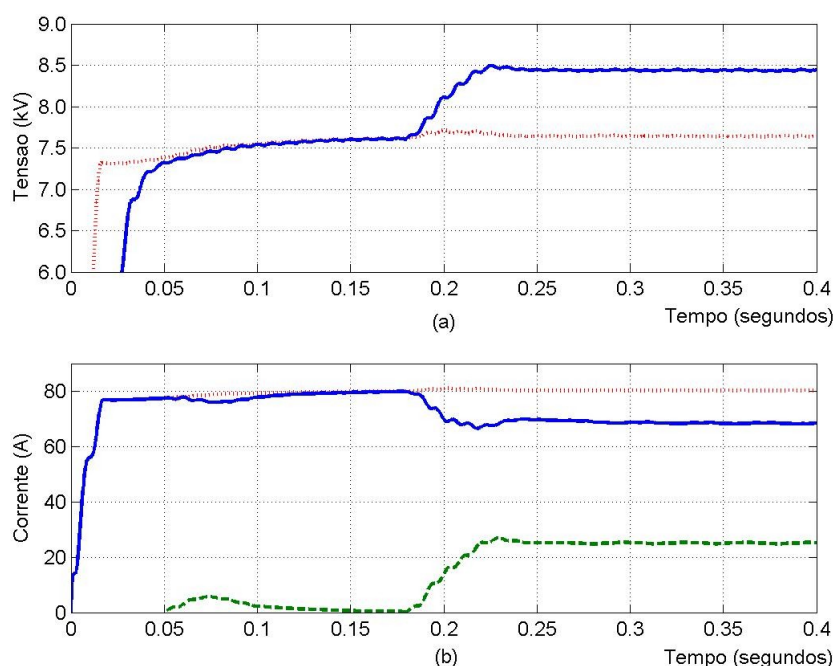


Fig. IV.9: Valor eficaz das tensões e correntes de fase.

- (a) Tensão fase-neutro no PCC (vermelho-pontilhado) x terminais do STATCOM (azul-sólido);  
 (b) Correntes de fase da carga (vermelho-pontilhado), do STATCOM (verde-tracejado) e da rede (azul-sólido).

## 4.2. 2º CENÁRIO BASE: SUBTENSÃO SUSTENTADA EM SISTEMA TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO SEM MITIGAÇÃO

O presente cenário base de análise considera que a rede encontra-se em uma condição de operação com desequilíbrio de carregamento de  $FD\% = 1,89\%$  entre suas fases à montante do ponto de instalação do STATCOM (a carga à jusante do STATCOM é trifásica e equilibrada), este calculado segundo metodologia proposta em [ 3 ]. Para tanto, cargas monofásicas desequilibradas foram inseridas ao longo do circuito em análise nas fases B e C e, de maneira similar ao cenário base anterior, os dispositivos de mitigação foram eliminados da simulação. A **Fig. IV.10** mostra a magnitude do desequilíbrio das tensões e correntes de fase da rede no PCC. Da sua análise, percebe-se que, apesar do fator de desequilíbrio de carregamento estar abaixo dos 2% proposto pela norma em audiência pública [ 3 ], este é calculado utilizando-se apenas as tensões fase-fase com o intuito de se eliminar eventual efeito das componentes de sequência zero da tensão nesta apuração, de sorte que a variação percebida nos valores eficazes das tensões em cada uma das fases tende a ser superior em razão da presença desta componente de sequência zero. Novamente, em função da modelagem das cargas como uma impedância constante e potência variável, a fase com maior corrente corresponde àquela de maior tensão. A pequena oscilação observada nos gráficos (b)

e (d) da **Fig. IV.10** é desprezível e está associada ao algoritmo de extração dos valores eficazes (rms) utilizado e à maximização da visualização (*zoom*) no intervalo de interesse.

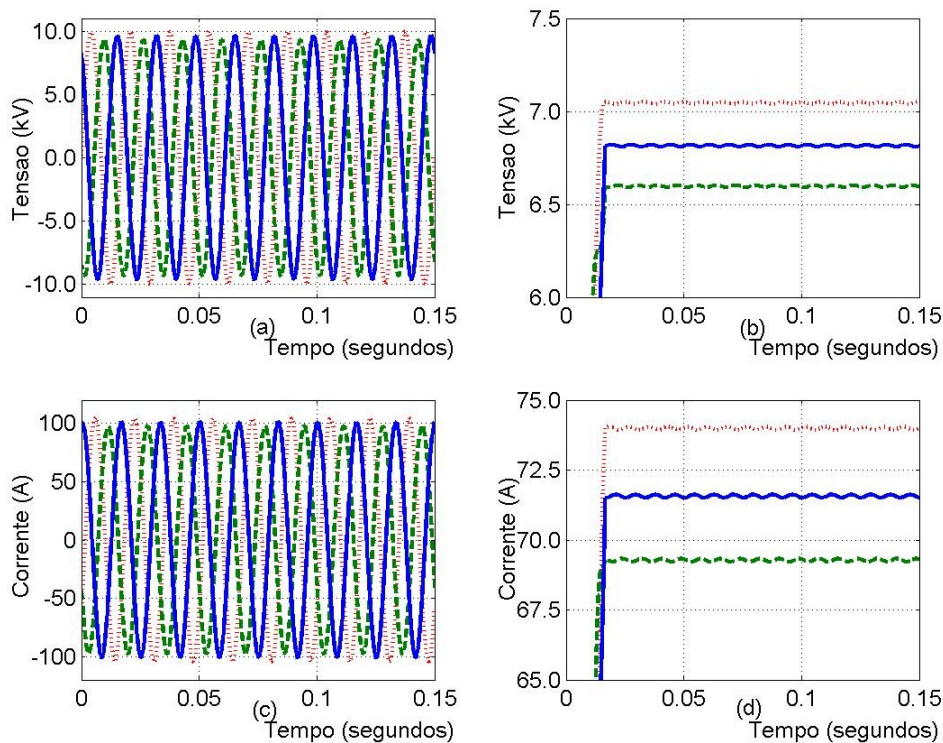


Fig. IV.10: Tensões fase-neutro e Correntes de fase desequilibradas no PCC

(a) Valores instantâneos das tensões de fase-neutro fornecidas pela rede;

(b) Valores eficazes das tensões de fase-neutro fornecidas pela rede;

(c) Valores instantâneos das correntes de fase fornecidas pela rede;

(d) Valores eficazes das correntes de fase fornecidas pela rede;

Vermelho-pontilhado – Fase A; Verde-tracejado – Fase B; Azul-sólido – Fase C.

#### 4.2.1. CENÁRIO A: APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

Para o circuito de distribuição em 13,8 kV desequilibrado anteriormente descrito, adotou-se apenas as técnicas clássicas de regulação e reequilíbrio das tensões na mitigação dos problemas descritos para este cenário de análise. A **Fig. IV.11** permite uma comparação com a **Fig. IV.10** em termos da magnitude do desequilíbrio das tensões e correntes de fase da rede no PCC. Observa-se que o regulador de tensão, apesar de reduzir o desequilíbrio para 0,9%, não foi totalmente eficaz. Tal fato ocorre em razão do equipamento ser capaz de mitigar apenas situações de desequilíbrio que ocorram à montante de seu ponto de instalação, sendo que, em uma condição de superação de sua capacidade de correção do problema, isto é, ocorrendo a saturação na ação de controle, considerando que a sua atuação é monofásica e no sentido da regulação das tensões para um determinado valor nominal e não do seu reequilíbrio propriamente dito, este tenderá a propagar o desequilíbrio no regime permanente. Da análise da **Fig. IV.11**, verifica-se que a fase com menor carregamento (Fase A) foi devidamente

regulada em seu valor nominal, enquanto que as demais fases ajustaram-se em valores inferiores ao nominal de acordo com o seu respectivo nível de carregamento.

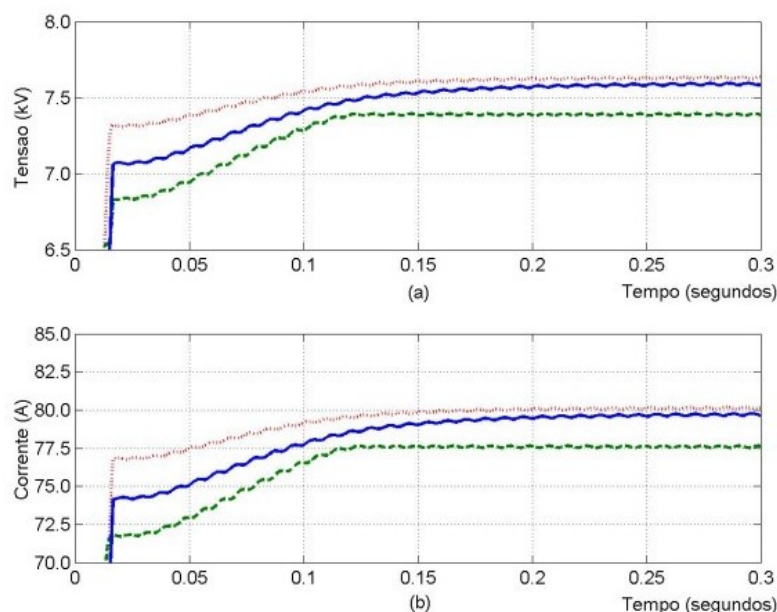


Fig. IV.11: Valores eficazes das tensões e correntes de fase desequilibradas da rede no PCC  
Vermelho pontilhado – Fase A; Verde tracejado – Fase B; Azul sólido – Fase C

A **Fig. IV.12** apresenta os valores eficazes das tensões fase-neutro na entrada (linha pontilhada) e saída (linha sólida) de cada uma das fases nos terminais do regulador de tensão, enquanto que a **Fig. IV.13** mostra os valores eficazes das correntes de fase nos seus enrolamentos primário (linha pontilhada) e secundário (linha sólida).

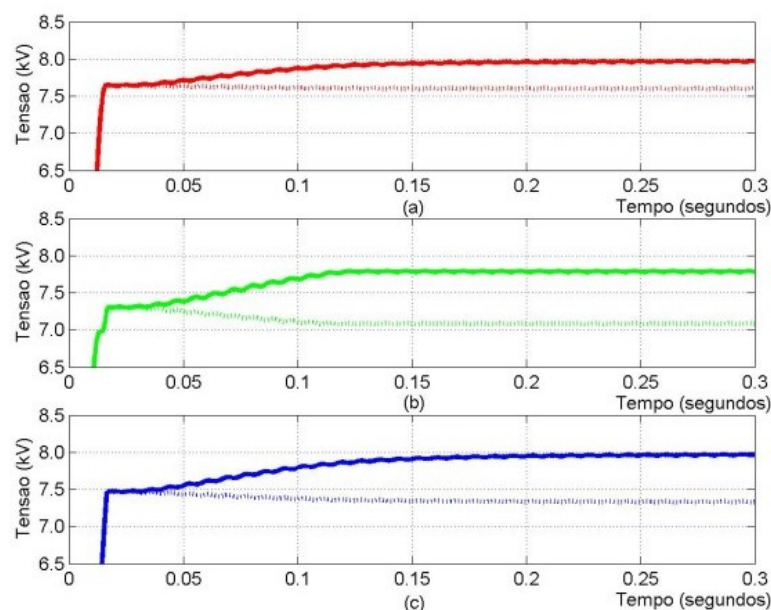


Fig. IV.12: Valores eficazes das tensões nos terminais de entrada e saída do RT  
(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C;  
Tensão de Entrada – linha pontilhada; Tensão de Saída - linha sólida.

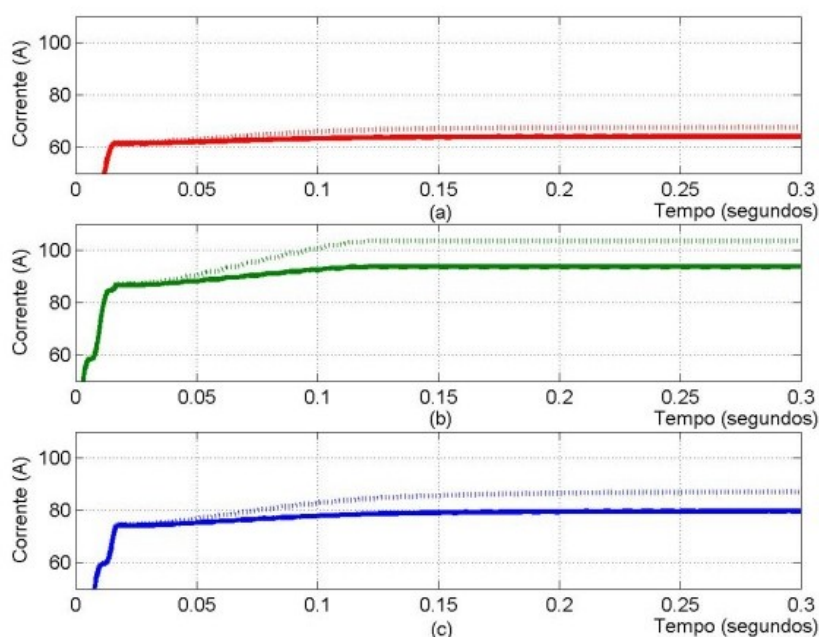


Fig. IV.13: Valores eficazes das correntes de fase nos terminais primário e secundário do RT

(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C;

Tensão de Entrada – linha pontilhada; Tensão de Saída - linha sólida.

Por fim, a **Fig. IV.14** exibe os parâmetros intrínsecos do funcionamento do regulador de tensão, ou seja, a tensão induzida em seus enrolamentos por acoplamento magnético e as correntes na bobina comum do auto-transformador, sendo possível a partir de sua análise identificar o esforço que o dispositivo realiza na compensação do desequilíbrio e regulação das tensões.

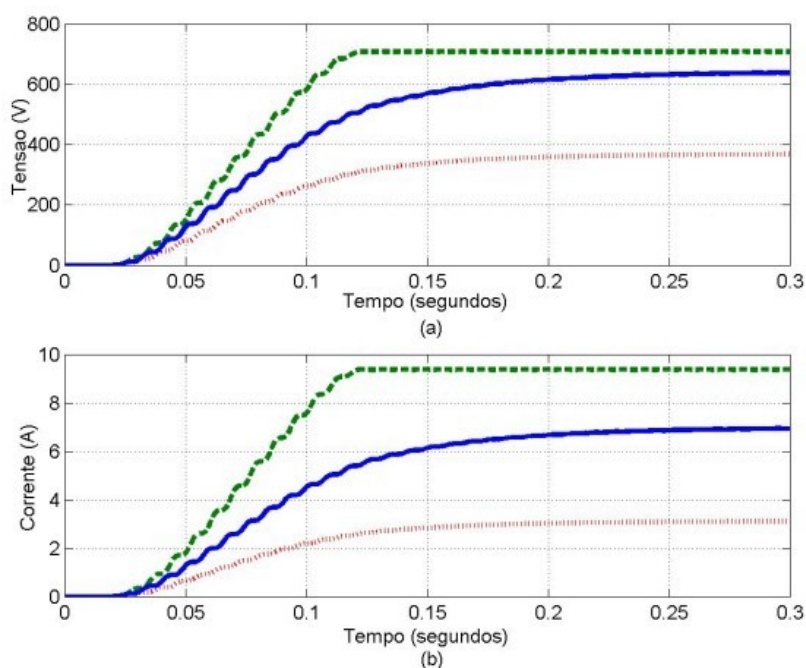


Fig. IV.14: Parâmetros do Regulador de Tensão – Valores Eficazes

(a) Tensões induzidas nos enrolamentos do RT por acoplamento magnético;

(b) Correntes no enrolamento comum do auto-transformador.

Fase A: Vermelho pontilhado; Fase B: Verde tracejado; Fase C: Azul sólido

Comparando-se a **Fig. IV.14 (a)** com a **Fig. IV.11 (a)**, observa-se que o esforço de regulação é menor na fase A, a qual apresenta menor carregamento, sendo possível alcançar a tensão nominal do sistema nesta fase. A fase C, com carregamento ligeiramente superior àquele da fase A, também é regulada para a tensão nominal do circuito, sendo o desequilíbrio de tensões observado na **Fig. IV.11 (a)** em razão de cargas desequilibradas à montante do RT<sup>8</sup>. Já a fase B, o nível de carregamento ultrapassa a capacidade de regulação do equipamento, saturando seu controle no limite máximo superior.

#### 4.2.2. CENÁRIO B: O STATCOM X O REGULADOR DE TENSÃO

Neste cenário, foram preservadas as condições de desequilíbrio e de afundamento nas tensões da rede, bem como os bancos de capacitores distribuídos ao longo do circuito. O regulador de tensão, porém, foi eliminado e o STATCOM foi inserido no PCC. A **Fig. IV.15** nos apresenta os valores eficazes das tensões fase-neutro e correntes de fase fornecidas pela rede amostradas no PCC, na qual se observa a eliminação completa do desequilíbrio nas tensões, bem como a sua elevação para um nível de tensão em torno de 7.550 V (0,947 p.u.) , aproximadamente 5,2% inferior ao seu valor eficaz nominal, porém dentro de uma faixa de tensão de atendimento considerada adequada pela legislação vigente.

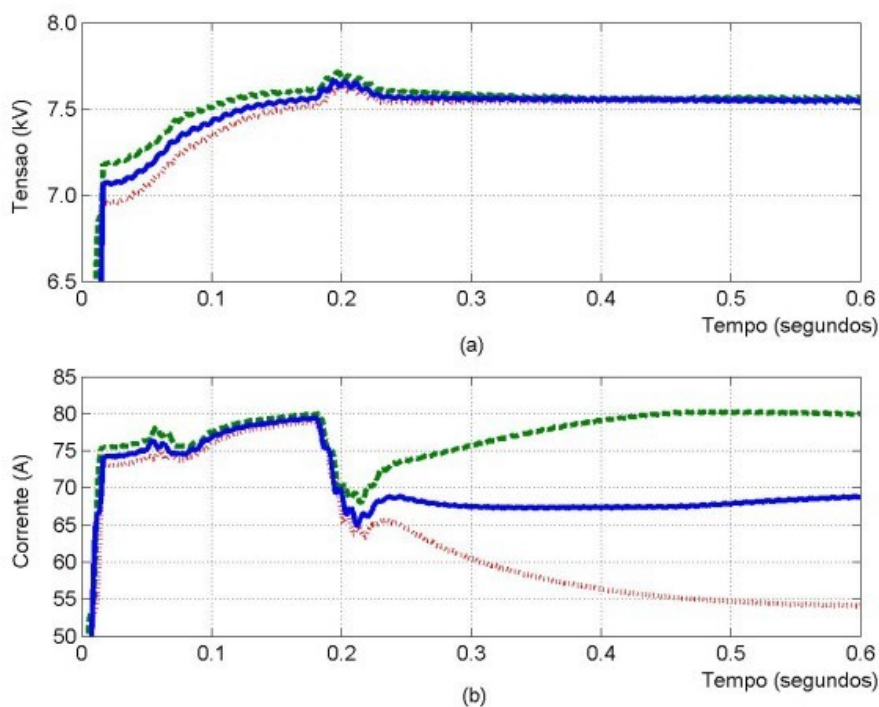


Fig. IV.15: Valores eficazes das tensões e correntes no PCC.

(a) Tensões fase-neutro; (b) Correntes de fase da rede.

Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido

<sup>8</sup> As tensões da **Fig. IV.11** são amostradas no PCC, enquanto que a **Fig. IV.14** exibe as tensões induzidas no RT.



As **Fig. IV.16** a **Fig. IV.18** apresentam os sinais das malhas de controle das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente, demonstrando a completa eliminação da componente de seqüência negativa pelo STATCOM, a saturação do controle da componente de seqüência positiva, impedindo o equipamento de eliminar completamente o afundamento sustentado na tensão, bem como a mitigação da componente de seqüência zero para um valor bastante próximo de zero (aproximadamente, -12 V). Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos no item 4.2.1, constata-se que o STATCOM apresenta um melhor desempenho no reequilíbrio e na regulação das tensões em regime permanente, permitindo, assim, uma análise técnico-financeira do tipo “trade-off” em termos da relação custo x benefício alcançada.

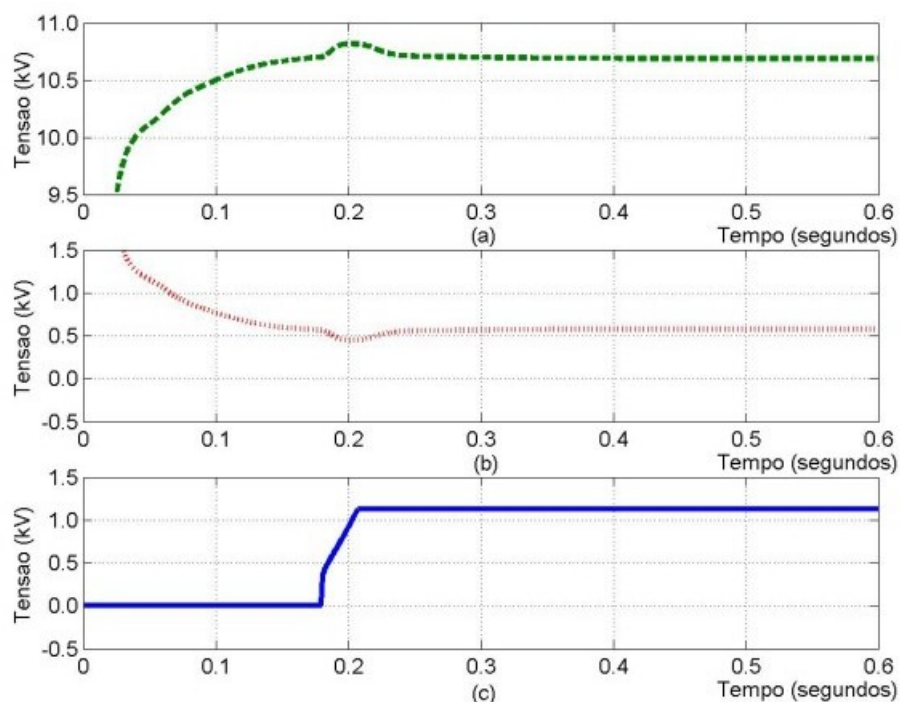


Fig. IV.16: Malha de controle da componente de seqüência positiva  
(a) Sinal de Entrada; (b) Sinal de Erro; (c) Sinal de Controle

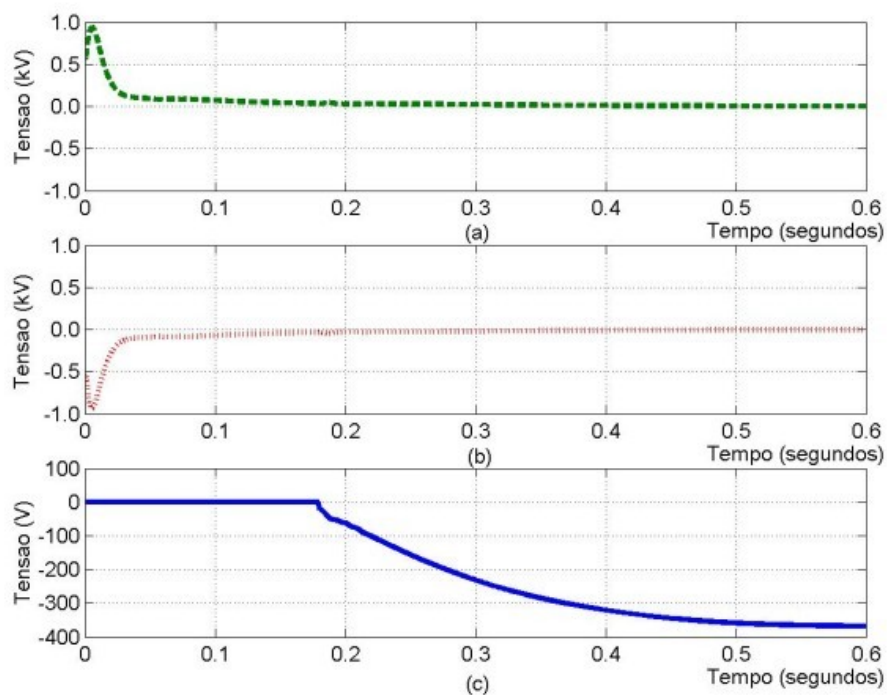


Fig. IV.17: Malha de controle da componente de seqüência negativa  
(a) Sinal de Entrada; (b) Sinal de Erro; (c) Sinal de Controle

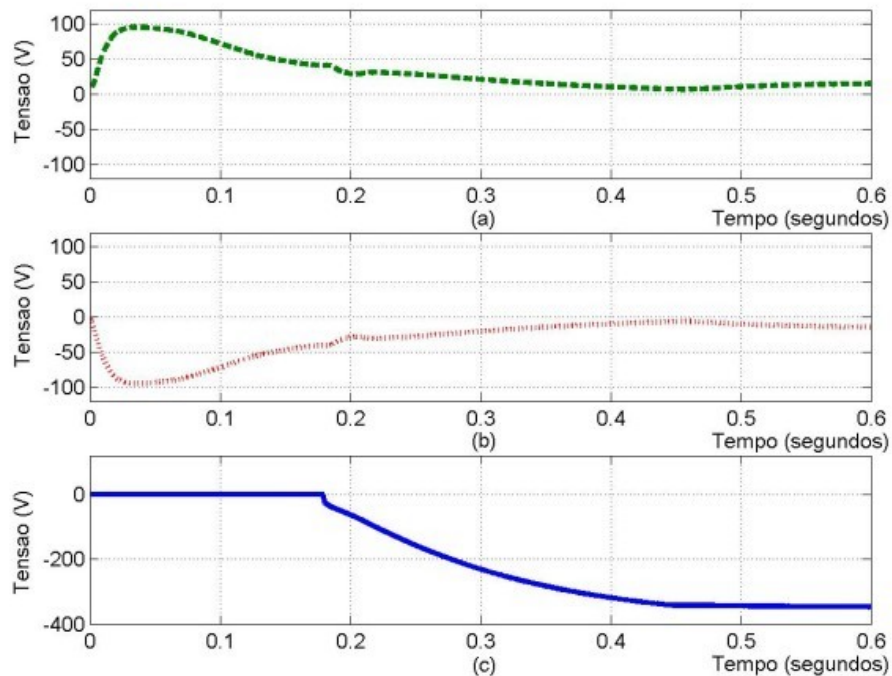


Fig. IV.18: Malha de controle da componente de seqüência zero  
(a) Sinal de Entrada; (b) Sinal de Erro; (c) Sinal de Controle

#### 4.2.3. CENÁRIO C: O STATCOM ASSOCIADO ÀS DEMAIS TÉCNICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

Na presente análise avalia-se a atuação conjunta do STATCOM com o RT e bancos de capacitores em condições de desequilíbrio e afundamento de tensões no circuito, de sorte a identificar-se algum benefício. Conforme apresentado na **Tabela IV.2**, o controle do RT é habilitado no instante 20 ms, atingindo o regime em 120 ms, enquanto que o STATCOM tem, no instante 50 ms, seu disjuntor de acoplamento com a rede fechado; no instante 75 ms, sua malha de controle do elo de corrente contínua do inversor habilitada e; em 180 ms, a habilitação da malha de controle das componentes de seqüência positiva, negativa e zero. A partir do instante 300 ms, todos os parâmetros de controle do STATCOM já foram ativados e as perturbações causadas à rede eliminadas, estando este em sua condição de regime permanente. As condições de carga/ operação utilizadas no presente cenário são devidamente apresentadas na **Tabela IV.1**. A **Fig. IV.19** mostra que não houve qualquer melhoria no nível de tensão ou no desequilíbrio entre-fases no PCC pela inserção em série do RT no circuito à montante do PCC, posto que resultado análogo àquele apresentado na **Fig. IV.15** foi obtido. As **Fig. IV.20** e **Fig. IV.21** demonstram que a utilização do STATCOM permitiu ao RT regular corretamente as tensões em seu valor nominal em todas as fases, com o benefício, ainda, de ter reduzido consideravelmente as correntes de fase em seus terminais secundários e, conseqüentemente as perdas elétricas no trecho.

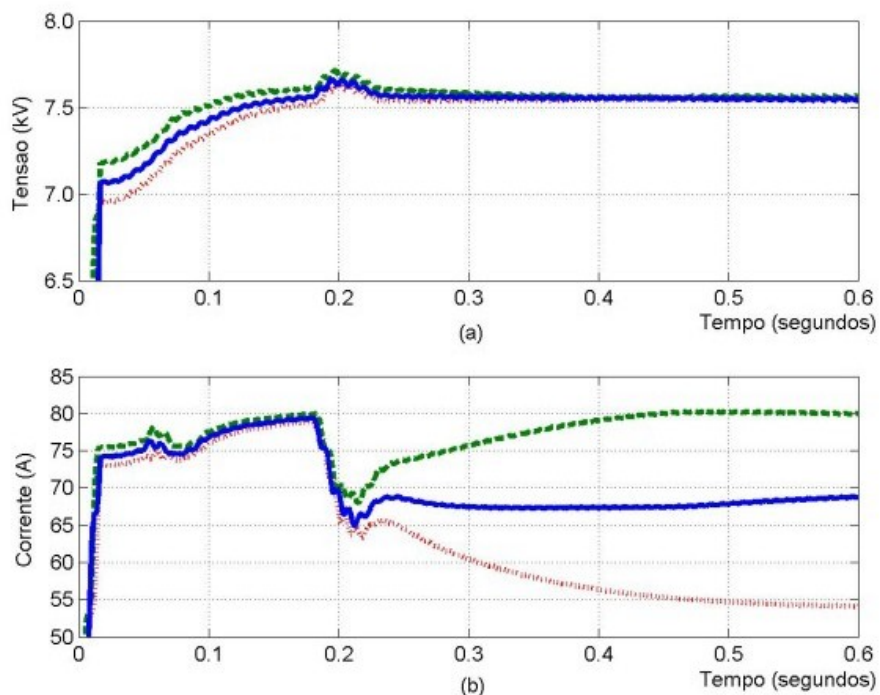


Fig. IV.19: Valores eficazes das tensões e correntes de fase da rede no PCC.  
(a) Tensão de fase-neutro; (b) Corrente de fase.

Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido.



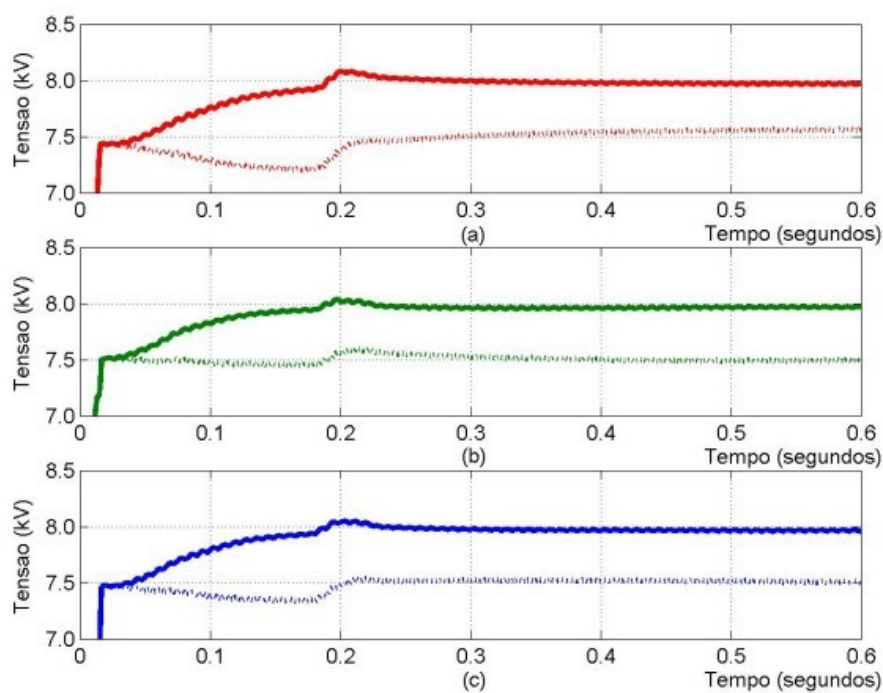


Fig. IV.20: Valores eficazes das tensões de fase nos terminais do RT.  
(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Terminal primário: linha pontilhada; Terminal secundário: linha sólida

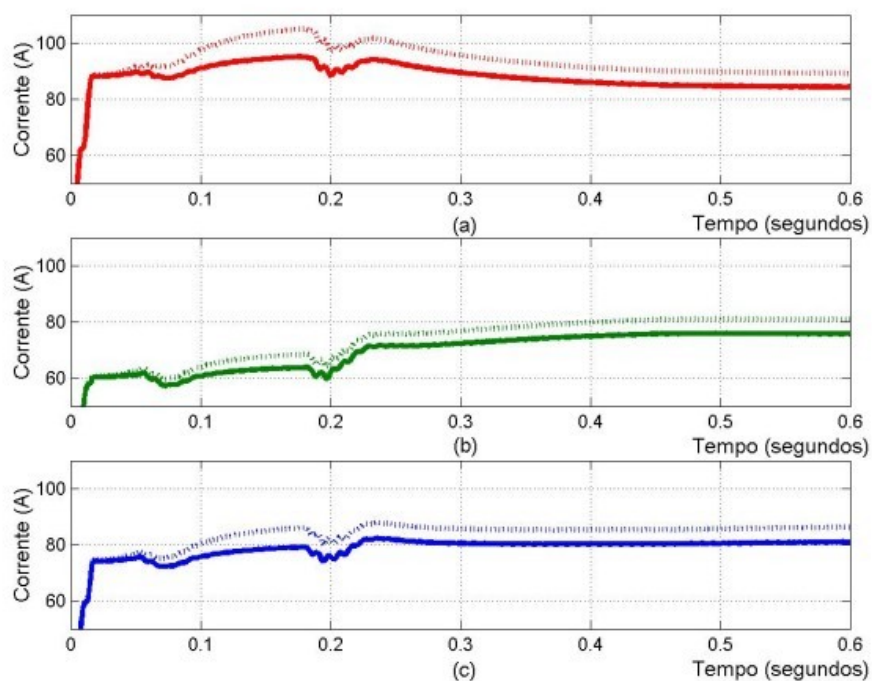


Fig. IV.21: Valores eficazes das correntes de fase nos terminais do RT  
(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Terminal primário: linha pontilhada; Terminal secundário: linha sólida

### 4.3. 3º CENÁRIO BASE: ANÁLISE DINÂMICA DE SISTEMA TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO COM CHAVEAMENTO DE CARGA TRIFÁSICA DESEQUILIBRADA

Para o circuito de distribuição em 13,8 kV da **Fig. I.2**, considere que, além da existência de um desequilíbrio de carregamento entre suas fases causado pelo atendimento de cargas monofásicas, este apresenta-se com um severo afundamento de tensão proporcionado pela alimentação de uma grande carga trifásica desequilibrada em sua extremidade, que pode ser desconectada a qualquer momento do sistema elétrico pela atuação da proteção interna da unidade consumidora ou ligada parcialmente e intempestivamente por seu responsável, ou pela falha de algum dispositivo de chaveamento, à revelia da concessionária. Para fins de simulação, considerou-se a rejeição integral da carga terminal desequilibrada de 2 MVA no instante 300 ms e seu retorno parcial, nas fases B e C somente, no instante 450 ms, simulando uma falha no chaveamento interno das cargas à unidade consumidora.

#### 4.3.1. CENÁRIO A: APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

Na presente análise apenas as técnicas clássicas de regulação e de reequilíbrio da tensão são utilizadas na mitigação dos problemas anteriormente descritos. Como a dinâmica do regulador de tensão permite a regulação e o reequilíbrio das tensões apenas em regime permanente, a simulação preserva durante os eventos transitórios os comandos de controle do equipamento pré-existent aos eventos, de sorte que o regulador de tensão não é capaz de percebê-los e atuar corretivamente no intervalo de tempo em questão. A **Fig. IV.22 (a)** e a **Fig. IV.22 (b)** ilustram esta condição operativa, exibindo os valores eficazes das tensões de fase-neutro e das correntes de linha no ponto de conexão da carga (PCC). O atraso observado de 20 ms nos valores eficazes de ambas figuras é devido ao algoritmo de extração dos valores eficazes utilizado na simulação. A **Tabela IV.3** apresenta os valores das tensões e correntes de fase fornecidas pela rede no PCC em cada um dos instantes do cenário simulado. Na sequência, na **Fig. IV.23 (a)** e **(b)**, tem-se a contribuição do regulador de tensão na elevação das tensões de fase-neutro à jusante de seu ponto de instalação, bem como as correntes na bobina comum do auto-transformador, respectivamente. A redução na corrente requerida pela carga após sua rejeição do sistema proporciona a elevação da tensão secundária independentemente da atuação do dispositivo. A **Fig. IV.24 de (a) a (c)**, exibe as tensões ABC nos terminais primário e secundário do equipamento, enquanto que a **Fig. IV.25 de (a) a (c)** mostra as correntes ABC nos seus circuitos primário e secundário. Da sua análise verifica-

se que o banco trifásico de reguladores de tensão monofásico busca proporcionar o equilíbrio das tensões e correntes em cada uma das fases em regime permanente. Entretanto, sua atuação encontra-se limitada ao desequilíbrio à montante de seu ponto de instalação e à variação máxima de 10% na tensão de cada uma das fases, ou seja, o equipamento não consegue solucionar satisfatoriamente o problema do desequilíbrio de tensão no presente caso. Ademais, conforme anteriormente relatado, a utilização do banco regulador de tensão implica na deterioração das condições operativas à montante do equipamento, de sorte que, para uma dada fase, observamos que a elevação da tensão no terminal secundário implica em uma maior corrente de carga circulando através dos terminais primários do equipamento, provocando, conseqüentemente, um maior afundamento na tensão de fornecimento à montante do ponto de sua instalação.

Tabela IV.3: Valores eficazes da tensão e corrente de fase da rede no PCC.

Intervalo	Tensão ( $V_b = 7.697$ Volts )						Corrente ( $S_b = 2,0$ MVA)						FD%
	Valor Real (Volts)			Valor em p.u.			Valor Real (Ampéres)			Valor em p.u.			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
200 a 300 ms	7733	7517	7629	0,971	0,943	0,958	56,80	102,6	80,10	0,679	1,226	0,957	0,95%
320 a 450 ms	9022	8480	8714	1,132	1,064	1,094	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,70%
Após 450 ms	7730	9023	7627	0,970	1,132	0,957	56,80	0,000	80,10	0,679	0,000	0,957	8,10%

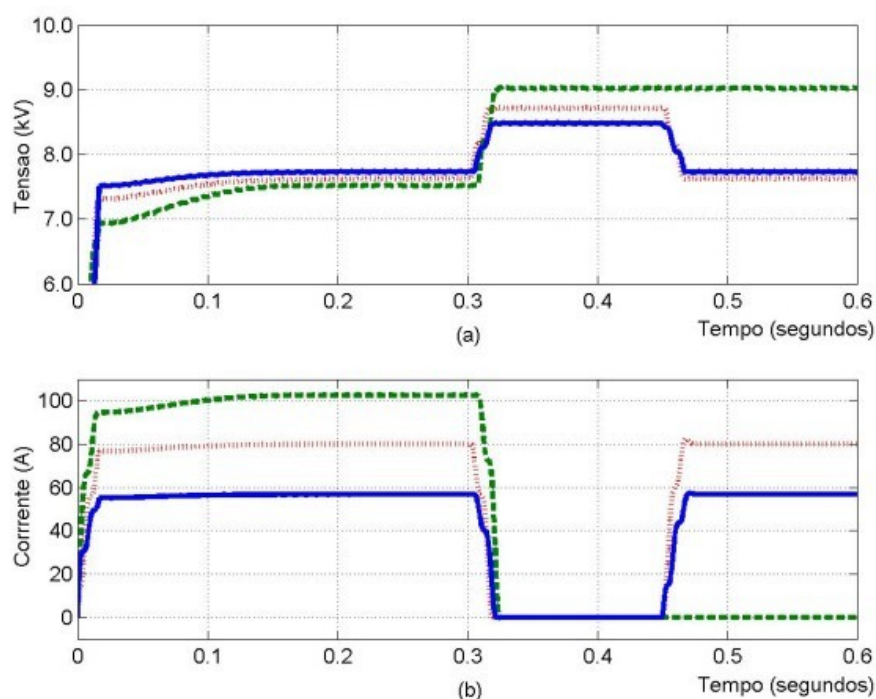


Fig. IV.22: Valores eficazes das tensões e correntes de fase no PCC.

(a) Tensões fase-neutro; (b) Correntes de fase.

Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido.

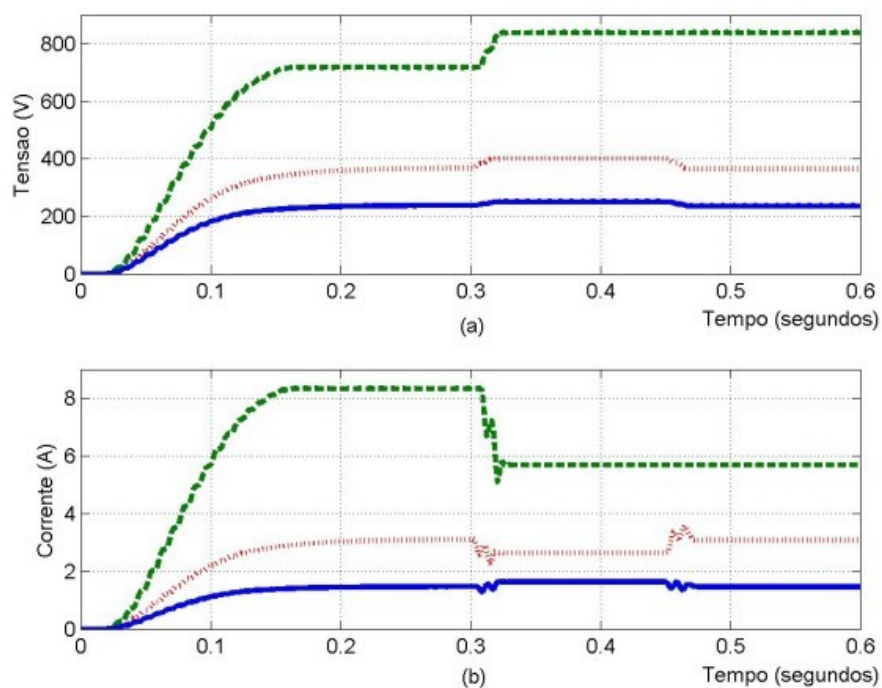


Fig. IV.23: Parâmetros do regulador de tensão.  
 (a) Tensão induzida nos enrolamentos por acoplamento magnético;  
 (b) Corrente na bobina comum do auto-transformador.  
 Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido.

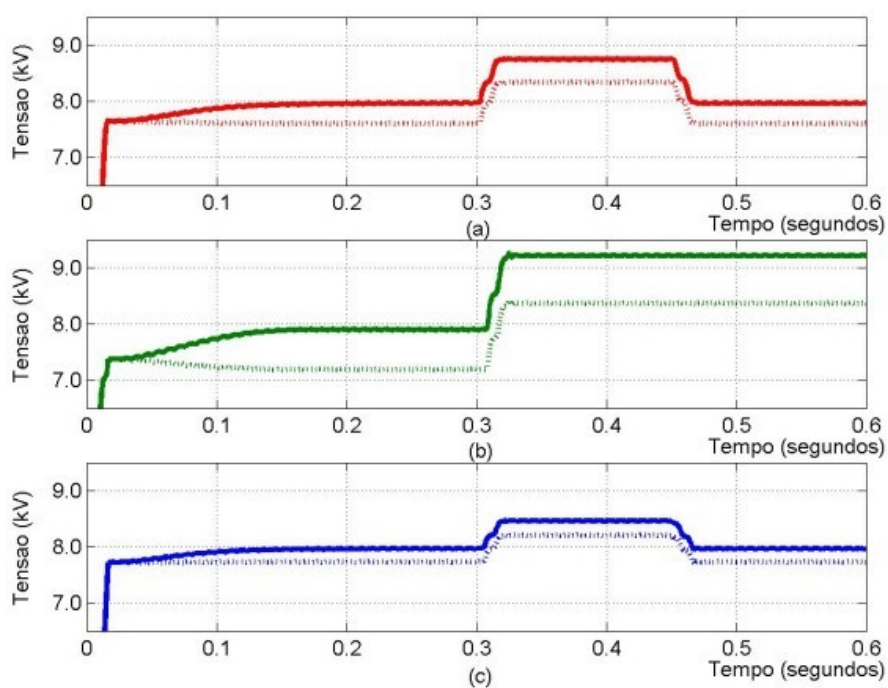


Fig. IV.24: Valores eficazes das tensões de fase nos terminais do RT.  
 (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Terminal primário: linha pontilhada; Terminal secundário: linha sólida

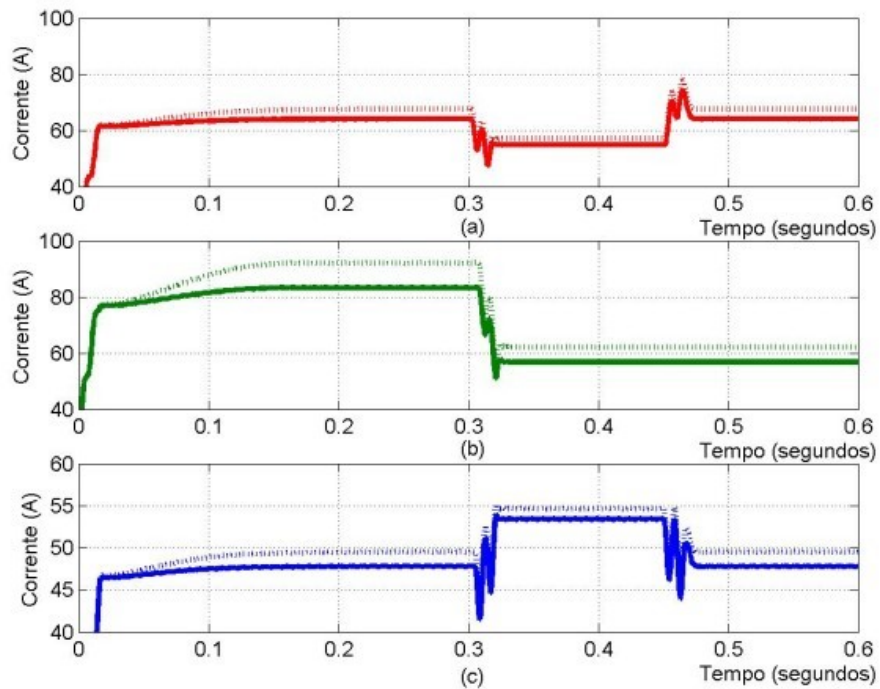


Fig. IV.25: Valores eficazes das correntes de fase nos enrolamentos do RT.

(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Enrolamento primário: linha pontilhada; Enrolamento secundário: linha sólida

#### 4.3.2. CENÁRIO B: O STATCOM X O REGULADOR DE TENSÃO

Dando prosseguimento às análises, para fins de comparação, o regulador de tensão foi retirado e um STATCOM de 600kVAr foi inserido no PCC. A **Fig. IV.26 (a)** e a **Fig. IV.26 (b)** demonstram a maior capacidade do STATCOM em proporcionar o reequilíbrio das tensões, através da injeção de correntes reativas distintas em cada uma das fases. De maneira similar à **Tabela IV.3**, a **Tabela IV.4** apresenta os valores das tensões e correntes de fase fornecidas pela rede no PCC em cada um dos instantes do cenário simulado, bem como o fator de desequilíbrio calculado segundo a metodologia proposta em [ 3 ]. No instante 50 ms, percebe-se um pequeno transitório oriundo do acoplamento do circuito do STATCOM com a rede, ocorrendo a ativação da sua malha de controle no instante 180 ms. A **Fig. IV.27 (a)** exibe a corrente distribuída pela rede (vermelho-pontilhado), a corrente requerida pela carga (verde-tracejado) e a corrente fornecida pelo STATCOM (azul-sólido), onde se observa uma redução na corrente fornecida pela rede, sem que haja uma redução na corrente de carga. A pequena elevação percebida na corrente de carga após o instante 180 ms, conforme relatado anteriormente, é devida à modelagem das cargas como impedância constante (potência variável). A **Fig. IV.27 (b)** e a **Fig. IV.27 (c)** mostram o sinal de erro praticamente nulo na malha de controle do elo de corrente contínua do STATCOM e a variação do ângulo de

potência do inversor estabilizando-se em torno de  $-0,03$  radianos, respectivamente. Na **Fig. IV.28** tem-se a representação do sinal de entrada (azul-sólido), do sinal de erro (vermelho-pontilhado) e do sinal de controle (verde-tracejado) das malhas de controle das componentes de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente. Da análise dessas figuras percebe-se que o STATCOM obtém um resultado bastante satisfatório em termos da regulação e do reequilíbrio das tensões, reduzindo consideravelmente as componentes de sequência negativa e zero, sobretudo durante o transitório de chaveamento da carga. O valor da tensão de pico em regime permanente, antes dos eventos, sofreu uma elevação de, aproximadamente, 150 V, permanecendo as tensões bem equilibradas durante todo o transitório de rejeição de cargas. Tanto antes do evento em análise, quanto após, no retorno das cargas em uma condição de desequilíbrio de carregamento por fase ainda mais severo do que aquela da premissa inicial ( $\pm 30\%$  de carregamento das fases B e C em relação à fase A), o STATCOM demonstrou-se incapaz de eliminar completamente o desequilíbrio em razão da severidade do problema e da limitação de potência que lhe foi imposta. Porém, ainda assim, a mitigação obtida para o fenômeno não pode ser desprezada. A **Fig. IV.29** apresenta uma síntese dos resultados demonstrados nas **Fig. IV.26** a **Fig. IV.28**, desta feita para um equipamento de potência de 1,2 MVar, onde se pode observar o reequilíbrio total das tensões (a partir do instante  $t = 0,18$  s) e uma elevação de, aproximadamente, 300 V no valor da tensão de pico em regime permanente, antes dos eventos em análise.

Tabela IV.4: Valores eficazes da tensão e corrente de fase da rede no PCC.

Intervalo	Tensão (V <sub>b</sub> = 7.697 Volts )						Corrente (S <sub>b</sub> = 2,0 MVA)						FD%
	Valor Real (Volts)			Valor em p.u.			Valor Real (Ampéres)			Valor em p.u.			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
200 a 300 ms	7483	7233	7388	0,939	0,908	0,927	56,5	71,2	69,5	0,675	0,851	0,831	0,85%
320 a 450 ms	8140	8140	8140	1,022	1,022	1,022	16,0	19,0	16,5	0,191	0,227	0,197	0,00%
Após 450 ms	7694	8083	7533	0,966	1,015	0,945	41,9	8,0	60,7	0,501	0,096	0,725	2,05%



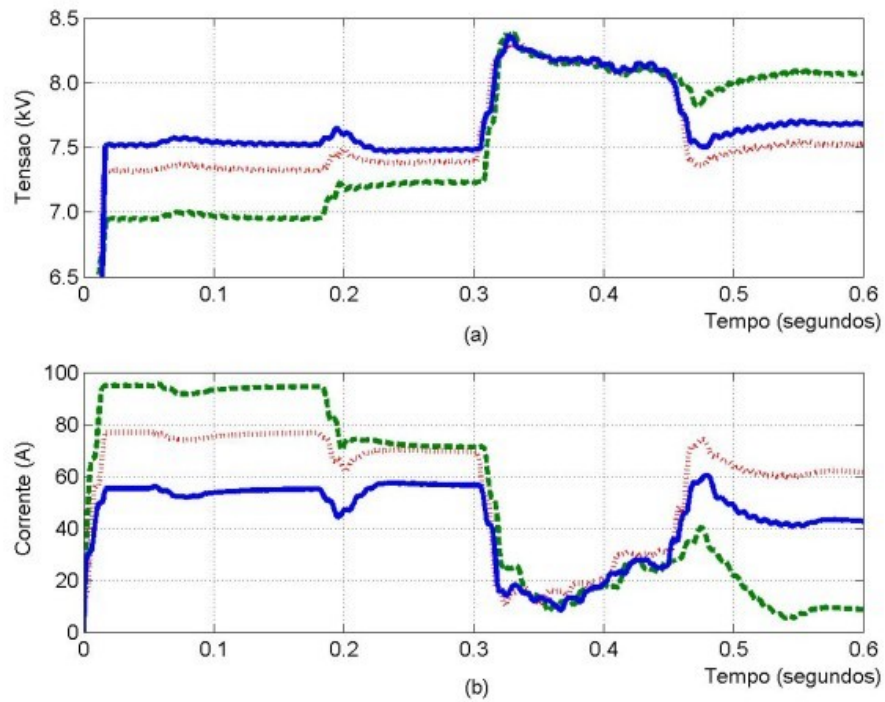


Fig. IV.26: Valores eficazes das tensões e correntes de fase da rede no PCC.  
 (a) Tensão de fase-neutro; (c) Corrente de fase.  
 Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido

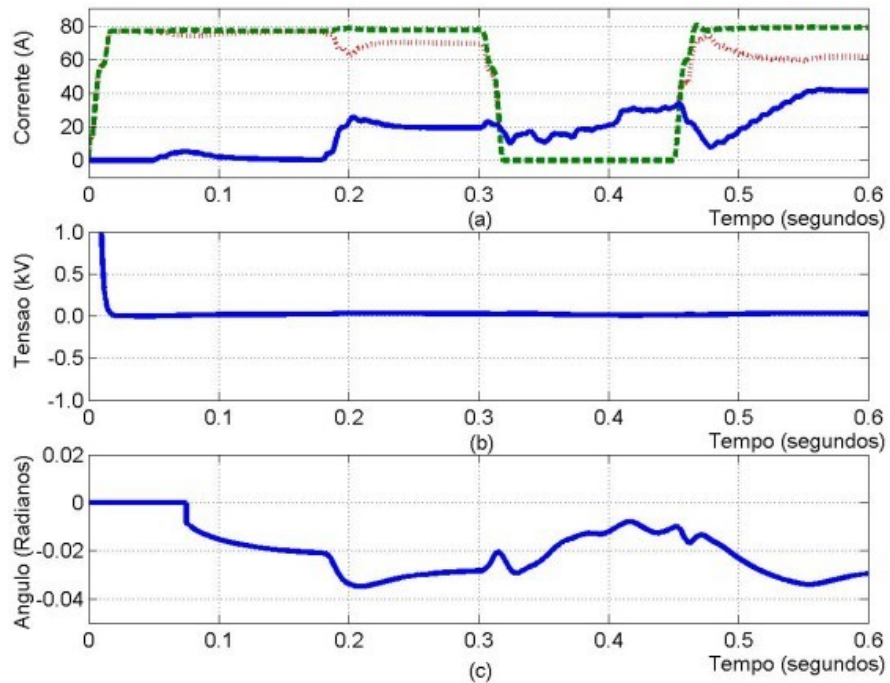


Fig. IV.27: Interação do STATCOM com a rede e a carga  
 (a) Valores eficazes das correntes no PCC:  
 Carga – verde tracejado, Rede – vermelho pontilhado, STATCOM – azul sólido;  
 (b) Sinal de erro da malha de corrente contínua do STATCOM; (c) Ângulo de potência do STATCOM.

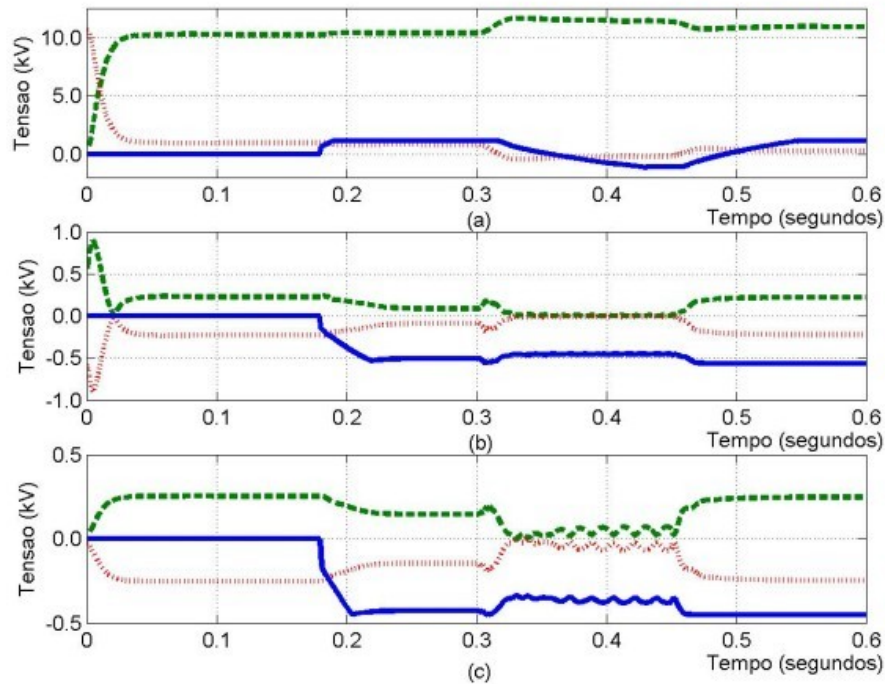


Fig. IV.28: Sinais das malhas de controle das componentes de seqüência.

(a) Seqüência Positiva; (b) Seqüência Negativa; (c) Seqüência Zero.

Sinal de Entrada: verde tracejado; Sinal de Erro: vermelho pontilhado; Sinal de Controle: azul sólido

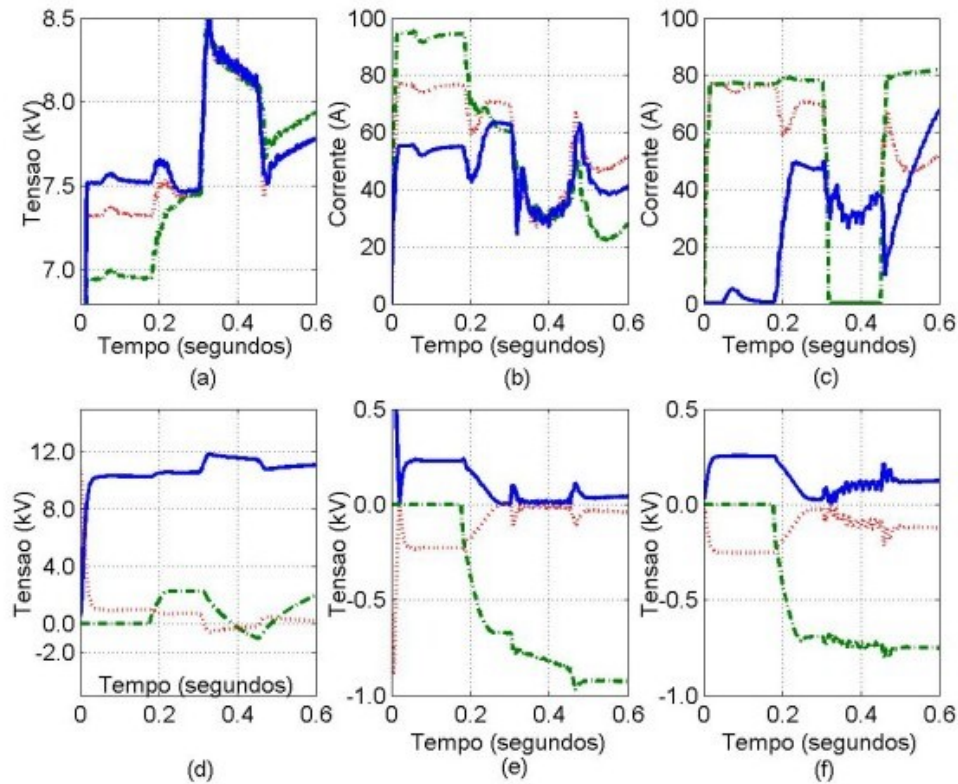


Fig. IV.29: Resultados para STATCOM de 1200 kVar.

(a) Valor eficaz das tensões de fase-neutro da rede amostradas no PCC; (b) Valor eficaz das correntes de fase da rede amostradas no PCC; (c) Valor eficaz das correntes no PCC: Corrente da rede – vermelho pontilhado, Corrente da Carga – verde tracejado, Corrente do STATCOM – azul sólido; (d) a (f) Sinais das malhas de controle das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente (Sinal de Entrada: azul sólida, Sinal de Erro: vermelho pontilhado e Sinal de Controle: verde tracejado).



Com os resultados ora apresentados, pode-se afirmar que o STATCOM consegue regular e reequilibrar as tensões individualmente e independentemente do ponto de localização da causa do desequilíbrio, pois sua única limitação é o montante de potência reativa que terá de fornecer/ absorver da rede. Por fim, ao fornecer/ absorver localmente potência reativa, o STATCOM reduz a magnitude da corrente distribuída pelo circuito, aliviando-o e, com isso, reduzindo as perdas elétricas.

#### 4.3.3. CENÁRIO C: O STATCOM ASSOCIADO ÀS DEMAIS TÉCNICAS DE REGULAÇÃO DA TENSÃO

Da **Fig. IV.30** à **Fig. IV.32** encontram-se apresentados os resultados obtidos com a utilização de ambas tecnologias, a partir dos quais se percebe que ambos equipamentos trabalham em complementaridade no regime permanente para proporcionar o reequilíbrio e a regulação das tensões de forma eficaz. Novamente, a **Tabela IV.5** apresenta os valores das tensões e correntes de fase fornecidas pela rede no PCC em cada um dos instantes do cenário simulado, bem como o fator de desequilíbrio calculado segundo a metodologia proposta em [ 3 ]. A **Fig. IV.30** apresenta graficamente os valores eficazes discriminados na **Tabela IV.5**. A utilização do STATCOM à jusante do regulador de tensão reduz consideravelmente, em regime permanente, a diferença entre as correntes do seu circuito primário e secundário, minimizando as perdas elétricas no circuito como um todo, conforme demonstra a **Fig. IV.32**. Entretanto, a dinâmica lenta do regulador de tensão potencializa o desequilíbrio das tensões nos eventos transitórios, sobretudo quando estes revelam uma severidade que excede a capacidade do STATCOM, como pode ser observado na **Fig. IV.30** e na **Fig. IV.33** a partir do instante 450 ms. Na **Fig. IV.33**, a saturação dos controladores das componentes de sequência negativa e zero é visível após o instante 450 ms.

Tabela IV.5: Valores eficazes da tensão e corrente de fase da rede no PCC.

Intervalo	Tensão (V <sub>b</sub> = 7.697 Volts )						Corrente (S <sub>b</sub> = 2,0 MVA)						FD%
	Valor Real (Volts)			Valor em p.u.			Valor Real (Ampéres)			Valor em p.u.			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
200 a 300 ms	7686	7594	7632	0,965	0,949	0,957	58,0	77,5	69,7	0,693	0,926	0,833	1,19%
320 a 450 ms	8480	8600	8520	1,064	1,079	1,069	19,8	41,5	18,7	0,237	0,496	0,223	0,25%
Após 450 ms	7688	8695	7496	0,965	1,091	0,941	62,3	42,3	82,5	0,745	0,506	0,986	2,05%

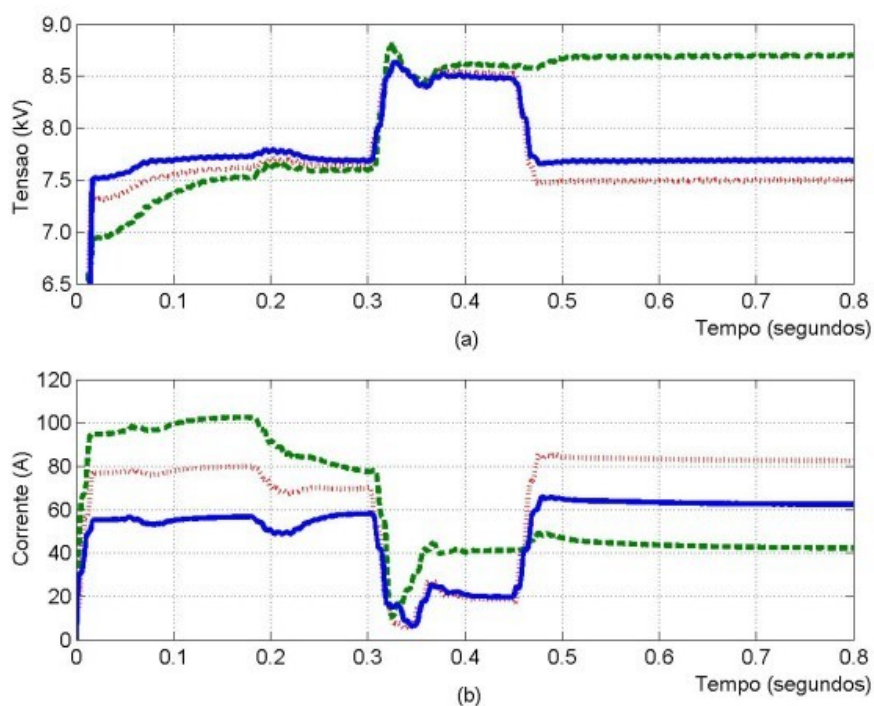


Fig. IV.30: Valores eficazes das tensões e correntes de fase no PCC.  
 (a) Tensão de fase-neutro; (b) Corrente de fase.  
 Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido

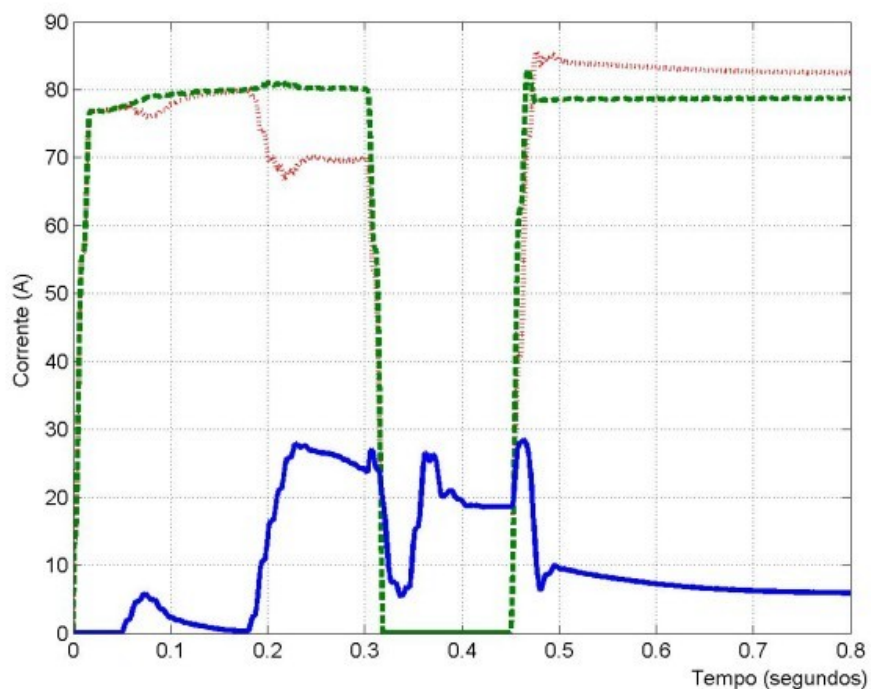


Fig. IV.31: Valor eficaz da corrente da fase A no PCC.  
 Rede: vermelho pontilhado; Carga: verde tracejado; STATCOM: azul sólido.

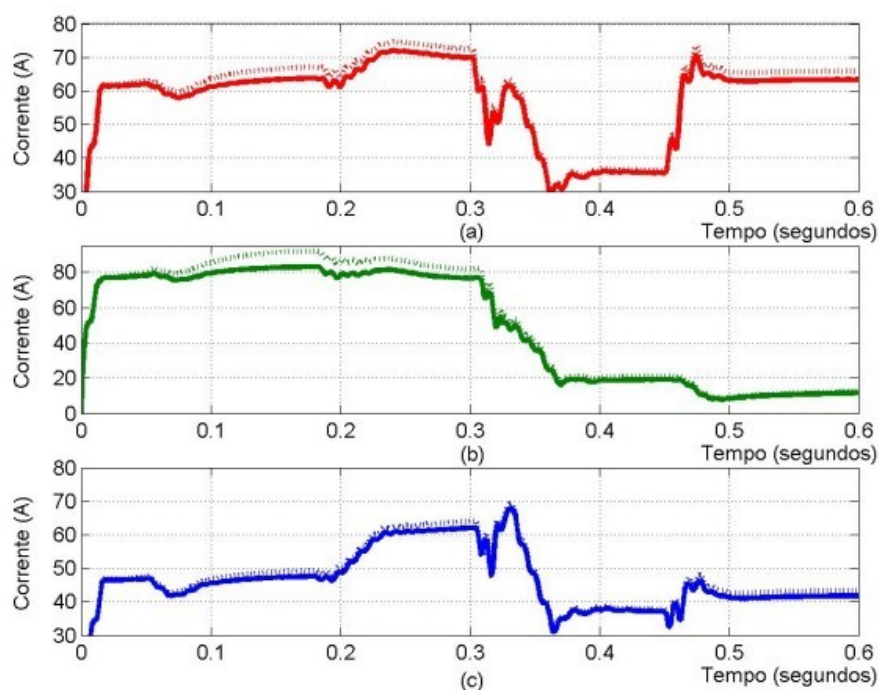


Fig. IV.32: Valores eficazes das correntes de fase nos enrolamentos do RT.

(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Terminal primário: linha pontilhada; Terminal secundário: linha sólida.

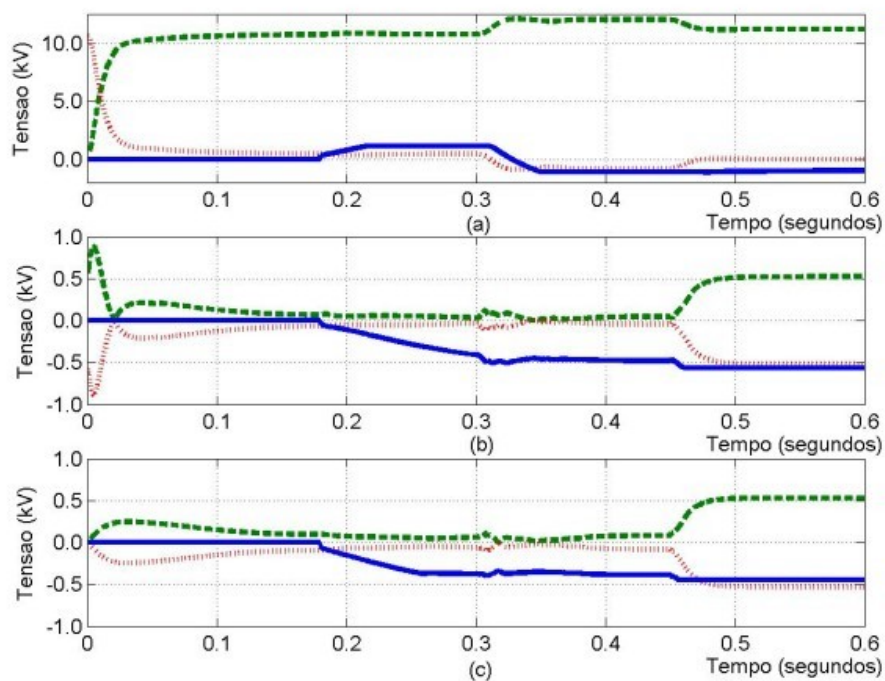


Fig. IV.33: Sinais das malhas de controle das componentes de seqüência.

(a) Seqüência Positiva; (b) Seqüência Negativa; (c) Seqüência Zero.

Sinal de Entrada: verde tracejado; Sinal de Erro: vermelho pontilhado; Sinal de Controle: azul sólido.

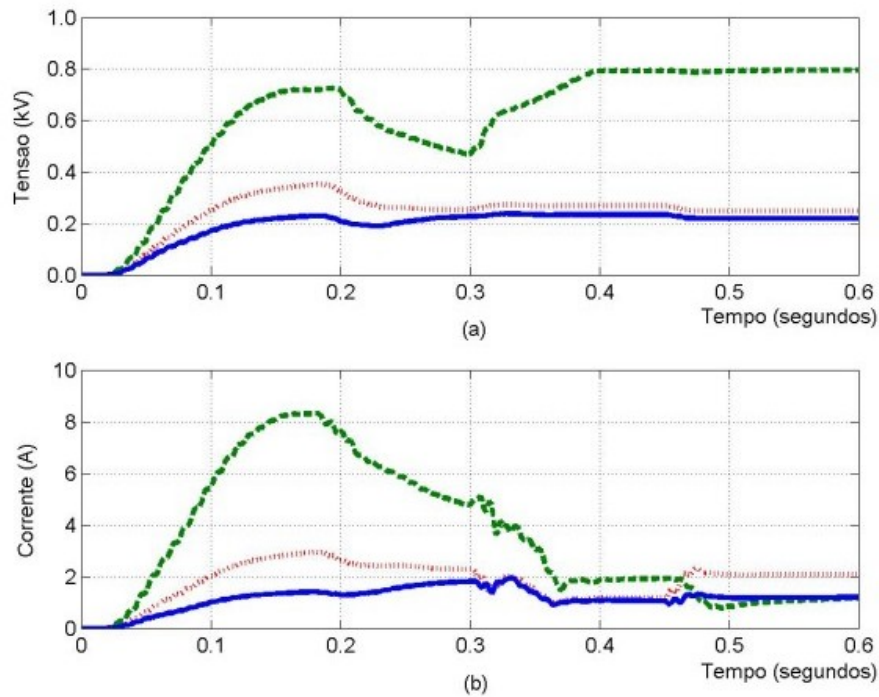


Fig. IV.34: Parâmetros do Regulador de Tensão.

(a) Tensão induzida no terminal secundário por acoplamento magnético;

(b) Corrente na bobina comum.

Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido.

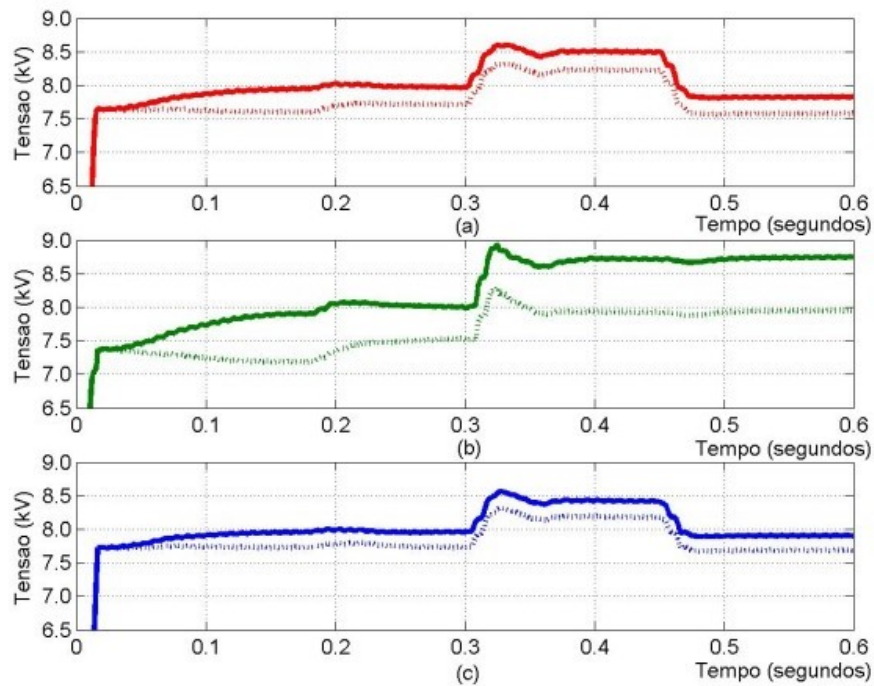


Fig. IV.35: Valores eficazes das tensões de fase nos terminais do RT.

(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Terminal primário: linha pontilhada; Terminal secundário: linha sólida.

Por fim, a **Fig. IV.36** exibe uma análise comparativa em termos da regulação e do reequilíbrio das tensões no PCC através da apresentação dos valores eficazes obtidos para as tensões e correntes de fase da rede em cada um dos cenários do item 4.3. Em regime

permanente, o melhor resultado é obtido com a utilização conjunta das técnicas, com a tensão de atendimento bastante próxima de seu valor nominal e o desequilíbrio entre as fases praticamente desprezível no ponto de amostragem (PCC). Entretanto, os resultados obtidos apenas com a presença do STATCOM (item 4.3.2), também são bastante favoráveis, posto que o desequilíbrio ( $FD\% < 1\%$ ) encontra-se dentro dos limites considerados adequados pelo PRODIST e pela resolução 505/2001 da ANEEL, enquanto que o nível da tensão eficaz em cada fase pode ser melhorado com a utilização de um equipamento de maior capacidade. A rejeição integral da carga terminal desequilibrada de 2 MVA no instante 300 ms provoca um surto de sobretensão desequilibrada e sustentada que é potencializada no caso em que apenas os dispositivos clássicos de mitigação são empregados, **Fig. IV.36 (a) e (d)**. Já no caso em que o STATCOM substitui o regulador de tensão, **Fig. IV.36 (b) e (e)**, temos uma melhor condição de equilíbrio das tensões, bem como uma forte mitigação do surto de sobretensão verificado durante o transitório. A **Fig. IV.36 (c) e (f)** exibe o caso em que ambos dispositivos estão presentes, onde percebe-se que o regulador de tensão restringe a capacidade de atuação do STATCOM ao potencializar o desequilíbrio e a sobretensão durante o fenômeno transitório. Entretanto, em regime permanente, as condições operacionais são mais adequadas.

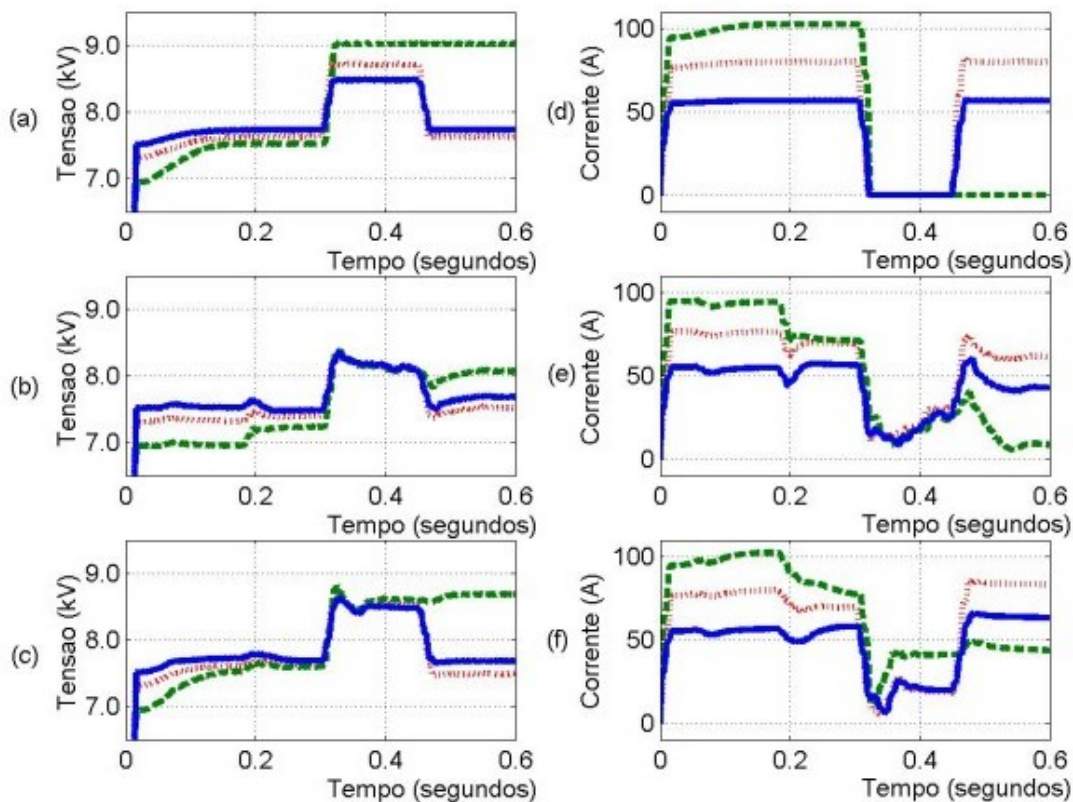


Fig. IV.36: Comparativo dos valores eficazes das tensões e correntes de fase no PCC em cada cenário.

- (a) a (c) Tensões de fase-neutro no PCC nos Cenários A, B e C, respectivamente;
- (d) a (f) Correntes de fase no PCC nos Cenários A, B e C, respectivamente;
- Fase A: vermelho pontilhado; Fase B: verde tracejado; Fase C: azul sólido.



#### 4.3.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS

A **Tabela IV.6** e a **Tabela IV.7** exibem uma análise comparativa de cada um dos cenários analisados do item 4.3, considerando a presença de um STATCOM de 0,6 MVar e de 1,2 MVar. Em ambos os casos, os valores demonstrados correspondem àqueles obtidos em regime permanente, antes dos eventos transitórios. O valor eficaz nominal da tensão fase-neutro é de 7.967,4 V.

Tabela IV.6: Valores eficazes das tensões no PCC, no instante 300 ms, considerando a utilização de um STATCOM de 0,6 MVar e de 1,2 MVar.

STATCOM:	0,6 MVar						1,2 MVar					
Cenário*	V <sub>a</sub>		V <sub>b</sub>		V <sub>c</sub>		V <sub>a</sub>		V <sub>b</sub>		V <sub>c</sub>	
	(V)	(p.u.)	(V)	(p.u.)	(V)	(p.u.)	(V)	(p.u.)	(V)	(p.u.)	(V)	(p.u.)
C	7633	0,958	7595	0,953	7687	0,965	7660	0,961	7615	0,956	7700	0,966
B	7387	0,927	7230	0,907	7485	0,939	7448	0,935	7448	0,935	7475	0,938
A	7629	0,958	7519	0,943	7731	0,970	7629	0,958	7519	0,944	7731	0,970

Tabela IV.7: Valores eficazes das correntes no PCC, no instante 300 ms, considerando a utilização de um STATCOM de 0,6 MVar e de 1,2 MVar.

STATCOM:	0,6 MVar						1,2 MVar					
Cenário*	I <sub>a</sub>		I <sub>b</sub>		I <sub>c</sub>		I <sub>a</sub>		I <sub>b</sub>		I <sub>c</sub>	
	(A)	(p.u.)	(A)	(p.u.)	(A)	(p.u.)	(A)	(p.u.)	(A)	(p.u.)	(A)	(p.u.)
C	70,0	0,837	77,6	0,927	58,0	0,693	68,5	0,819	73,0	0,872	58,7	0,702
B	69,5	0,831	71,2	0,851	56,5	0,675	69,8	0,834	60,0	0,717	62,7	0,749
A	80,0	0,956	103,0	1,231	56,5	0,675	80,0	0,956	103,0	1,231	56,5	0,675

\* Cenário C: presença do regulador de tensão e do STATCOM

Cenário B: presença apenas do STATCOM

Cenário A: presença apenas do regulador de tensão

Da análise dos resultados obtidos, verifica-se que o benefício obtido com a utilização de um equipamento de maior capacidade é marginal, não compensando o acréscimo de custos e de complexidade em sua instalação, mesmo porquê a inversão do fluxo de potência reativa no circuito manteria ou elevaria o nível das perdas elétricas.

#### 4.4. CONCLUSÕES

Ao longo do CAPÍTULO IV vários cenários foram simulados, estes considerando o atendimento de cargas trifásicas equilibradas e desequilibradas através de redes trifásicas ora equilibradas, ora desequilibradas, utilizando-se o STATCOM em complementação ou em substituição aos dispositivos convencionais de regulação e reequilíbrio de tensão, de sorte a se obter um quadro comparativo dos benefícios extraíveis de sua presença. Quanto aos bancos de capacitores e reguladores de tensão usualmente empregados para a regulação e o reequilíbrio das tensões, percebe-se, claramente, as limitações destes quanto à sua capacidade de operação

apenas em regime permanente, enquanto que o STATCOM permite uma rápida adaptação às condições dinâmicas do circuito. A presença do STATCOM em um circuito, além de proporcionar menores perdas elétricas, implica, ainda, em menores custos de manutenibilidade dos bancos de capacitores e reguladores de tensão, posto que as comutações destes serão extremamente reduzidas, haja vista que o ajuste “fino” do reequilíbrio e regulação das tensões será implementado pelo STATCOM, cabendo aos bancos reguladores e de capacitores apenas as correções que envolverem fenômenos de alta severidade e grande duração que superarem a capacidade do STATCOM. Por fim, observou-se que as técnicas não são, necessariamente, mutuamente excludentes, havendo espaço para análises técnico-financeiras que viabilizem a sua utilização em regime complementar ou substitutivo.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES

Dentre os aspectos positivos observados na proposta de trabalho ora desenvolvida, ressalta-se que, em toda documentação técnica elaborada nos últimos anos sobre o assunto em questão, rariíssimas vezes percebeu-se uma preocupação do autor em analisar a utilização de dispositivos FACTS sob a ótica de uma concessionária de serviço público de distribuição de energia elétrica. Com relação aos dispositivos STATCOMs não foram encontradas quaisquer referências com este enfoque, principalmente um material que se dispusesse a realizar uma análise de simulação de um caso real, enfocando a geração estática de potência reativa na regulação e reequilíbrio das tensões de uma barra no contexto de uma utilização combinada com as técnicas clássicas atualmente empregadas para tanto. Outro ponto a ser salientado, à título de contribuição, foi a modelagem desenvolvida para a simulação do funcionamento de um regulador de tensão clássico, baseado na estrutura de um auto-transformador, a partir de fontes controladas de tensão e de corrente para representar a variação da tensão induzida por acoplamento magnético entre os seus enrolamentos e a potência transmitida por condução, respectivamente, uma vez que nenhum trabalho que abordasse esta questão foi identificado na documentação técnica disponível.

No presente estudo, o objeto das análises desenvolvidas foi a regulação e o reequilíbrio dinâmicos das tensões exclusivamente no ponto de conexão de uma grande carga industrial de natureza sensível aos fenômenos elétricos comuns às redes de distribuição. Assim sendo, não houve interesse no desenvolvimento de análises que considerassem o reposicionamento do STATCOM em outros pontos do alimentador, eliminando ou complementando a atuação de bancos de capacitores e/ou de reguladores de tensão. Tampouco, preocupou-se com o monitoramento das condições de atendimento em outros pontos do circuito, posto que, ressaltando novamente, a análise restringia-se à preservação das condições de atendimento no PCC. Dos resultados apresentados extrai-se que o STATCOM pode vir a substituir o regulador de tensão clássico na mitigação de afundamentos e desequilíbrios na tensão de fornecimento em regime permanente, com a vantagem de ser capaz de lidar com desequilíbrios da rede à montante e à jusante de seu ponto de instalação, além de proporcionar uma redução nas perdas elétricas devido à menor corrente requerida da rede para alimentação às cargas. Em condições transitórias durante eventos comuns do sistema elétrico, suas qualidades características tornam-se ainda mais marcantes.



Notoriamente, o projeto de um STATCOM considera a utilização de dispositivos com capacidade de aproximadamente 30% do valor da carga a ser trabalhada, por este motivo a maior parte das análises foram desenvolvidas a partir dos resultados obtidos de simulações considerando um dispositivo de 600 kVAr de potência. Entretanto, no presente estudo também foi explorada a possibilidade de que o STATCOM, instalado na barra da carga, fôsse utilizado para mitigar os efeitos de cargas instaladas em outros pontos do sistema que não o PCC, dimensionando-se, para tanto, um dispositivo com o dobro desta capacidade (item 4.3.2). A conclusão que se chega neste caso é que o benefício obtido com a utilização de um equipamento de maior capacidade é marginal, não compensando o acréscimo de custos e de complexidade em sua instalação, mesmo porquê a inversão do fluxo de potência reativa no circuito manteria ou elevaria o nível das perdas elétricas. Como uma desvantagem inerente à utilização do STATCOM, observou-se que a sua resposta dinâmica varia em função da topologia da rede à montante e da carga atendida à jusante do seu ponto de conexão ao sistema, havendo, portanto, a necessidade do desenvolvimento de um projeto de compatibilização dos ganhos das suas malhas de controle que contemple as diversas configurações possíveis para o circuito. Por outro lado, tendo em vista o fato de que a escala de tempo envolvida na operação do STATCOM é da ordem de mili-segundos, enquanto que o chaveamento de banco de capacitores e a comutação entre os taps de um regulador de tensão levam vários segundos, constata-se a possibilidade de uma operação complementar entre estas técnicas, resultando, assim, em uma maior estabilidade na operação do sistema elétrico envolvido, com ganhos consideráveis na mitigação dos fenômenos elétricos em discussão. Em síntese, as técnicas não são mutuamente excludentes, mas podem, em alguns casos, constituírem alternativas técnicas distintas, devendo, portanto, serem analisadas sob a ótica do menor custo global para o melhor resultado qualitativo a ser alcançado. A utilização do STATCOM em complementação aos dispositivos convencionais de reequilíbrio e regulação das tensões, além de permitir uma redução considerável das perdas elétricas no circuito até seu ponto de conexão à rede e após ele, implicará em menores custos de manutenabilidade destes dispositivos, posto que as suas comutações serão reduzidas, haja vista que o STATCOM atuará mais rapidamente, promovendo o “ajuste fino” dos parâmetros da rede.

Por fim, pelos resultados apresentados, a utilização do STATCOM em complementação às técnicas clássicas de regulação e reequilíbrio das tensões seria recomendada para a solução de problemas pontuais causados pelo atendimento a grandes blocos de cargas concentrados em pontos distantes das subestações de distribuição. Por outro lado, deve ser avaliada a possibilidade do STATCOM vir a substituir a instalação de bancos

de capacitores (sobretudo os automáticos) e de reguladores de tensão quando estes forem previstos em pontos eletricamente próximos em um dado alimentador pelos estudos de planejamento do sistema. Outra possibilidade a ser avaliada seria a utilização do STATCOM na fronteira das cargas urbanas com as cargas rurais, proporcionando um maior isolamento dos fenômenos elétricos de uma sobre a outra, em complementação às proteções fornecidas pelos religadores de linha.

À título de continuidade do trabalho então desenvolvido sugere-se a complementação das análises, incorporando-se a elas o viés econômico, representado este pelo custo de aquisição e instalação de cada alternativa técnica, bem como uma avaliação das opções de equipamentos inversores já disponíveis no mercado para utilização nos níveis de tensão e potência ora avaliados, de sorte a se determinar a sua melhor configuração construtiva e aplicação distribuída. Pode-se, ainda, explorar com maior profundidade as situações em que a utilização do STATCOM deve ser vista como uma alternativa técnica aos dispositivos convencionais, bem como as situações em que esta utilização deve ser complementar. Outra linha de pesquisa estaria relacionada ao ponto “ótimo” de instalação de um STATCOM em um circuito extenso com cargas de naturezas distintas distribuídas ao longo de seu traçado, considerando, para tanto, a redução do nível de perdas elétricas e a regulação e o reequilíbrio de tensões em barras intermediárias do alimentador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [ 1 ] Tom A. Short, “Electric Power Distribution Handbook”, CRC Press LLC, 1<sup>st</sup> Edition, Chapters 5, 6 & 11, pp. 233-267, 269-310 & 539-586, 2004.
- [ 2 ] Resolução Normativa n° 505, de 26 de novembro de 2001, ANEEL, republicada na íntegra, por razão de incorreções na republicação do D.O. de 16.01.2004, seção 1, p. 43, v. 141, n. 11.
- [ 3 ] “Procedimentos da Distribuição – PRODIST”, ANEEL, Audiência Pública n° 014/2008, Módulo 8, acessado em 29/04/2008 no endereço: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br).
- [ 4 ] “Manual de Instrução para Reguladores de Tensão Monofásicos”, Toshiba, EP-40017, Revisão C, Janeiro/2007.
- [ 5 ] J. Dixon, L. Mórán, J. Rodríguez, R. Domke, “Reactive Power Compensation Technologies: A State-of-the-Art Review”, *IEEE Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, No. 12, pp. 2144-2164, December 2005.
- [ 6 ] V. Del Toro, “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, Ed. Prentice-Hall do Brasil, 1<sup>a</sup> Edição em Português, 1994.
- [ 7 ] Yong Hua Song, A. T. Johns, “Flexible ac transmission systems (FACTS)”, IEE Power and Energy Series 30, 1<sup>st</sup> Ed., U.K.
- [ 8 ] San-Yi Lee, Chi-Jui Wu, “Combined Compensation Structure of an SVC and an Active Filter for Unbalanced Three-Phase Distribution Feeders with Harmonic Distortion”, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management – APSCOM-97*, pp. 543-548, Hong-Kong, November 1997.
- [ 9 ] C. Hochgraf, R. H. Lasseter, “STATCOM Controls for Operation with Unbalanced Voltages”, *IEEE Trans.s on Power Deliv.*, Vol. 13, No. 2, pp. 538-544, April 1998.
- [ 10 ] S. Chen, G. Joós, L. T. Morán, “Dynamic Performance of PWM STATCOMs Operating under Unbalance and Fault Conditions in Distribution Systems”, *IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting 2001*, Vol. 2, pp. 950-955, Columbus, OH, USA.

- [ 11 ] D. G. de M. Pimentel, F. da C. Lopes, L. G. B. Rolim, E. H. Watanabe, “Análise e Validação Experimental de um STATCOM para Regulação de Tensão”, CBA 2004.
- [ 12 ] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, “Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”, IEEE Press & Wiley Interscience, 1999, ISBN 0-7803-3455-8, IEEE Order No. PC5713.
- [ 13 ] W. Freitas, A. M. França, “Modelagem e Análise Dinâmica de Dispositivos DSTATCOM usando o SimPowerSystems para MatLab/ Simulink”, Revista Controle & Automação, Vol. 16, No. 2, Abr–Jun/2005.
- [ 14 ] W. D. Stevenson Jr., “Elements of Power System Analysis”, 4th Ed., Mc-Graw Hill, March-1982.
- [ 15 ] A. Campos, G. Joos and J. F. Lindsay, “Dynamic analysis and design of a static series compensator for unbalanced AC voltage supplies,” in ConJ Rec. IEEE IAS’94. pp. 954-961.
- [ 16 ] A. S. Sedra, K. C. Smith, “Microelectronic Circuits”, 5<sup>th</sup> Ed., Makron Books Ltda., 2003.

## APÊNDICE A

### TRANSFORMAÇÃO PARA O EIXO DE REFERÊNCIA SÍNCRONO EM CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO

Em [ 9 ], temos o detalhamento da transformação das grandezas no domínio do tempo para os fasores de componente de seqüência positiva, negativa e zero. Entretanto, em uma análise mais acurada, percebeu-se que os autores cometeram um equívoco na definição das relações trigonométricas consideradas para expurgar a componente de 2º harmônico na transformação para o eixo de referência síncrono tradicional sob condições de desequilíbrio e, assim, poder estender a sua aplicação ao caso em questão. Dessa forma, o presente apêndice apresenta toda a formulação matemática desenvolvida, considerando as corretas relações trigonométricas, conforme apresentadas na **Fig. III.3**.

A **Fig. A.1** mostra o processo de transformação das tensões de fase no domínio do tempo para as componentes de seqüência positiva, negativa e zero no eixo de referência síncrono. Como premissas básicas temos que a tensão de cada fase é, fundamentalmente, senoidal com um dado defasamento angular  $\phi$ , conforme demonstrado em (29), e quaisquer distorções harmônicas são eliminadas pela filtragem.

$$\begin{aligned} v_a(t) &= |V_a| \cdot \sin(\theta + \phi_a) \\ v_b(t) &= |V_b| \cdot \sin(\theta + \phi_b) \\ v_c(t) &= |V_c| \cdot \sin(\theta + \phi_c) \end{aligned} \quad (29)$$

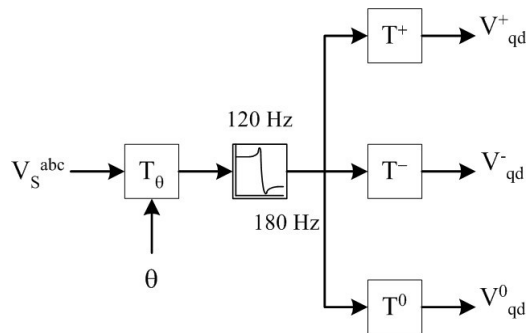


Fig. A.1: Diagrama de blocos da transformação das componentes de seqüência no eixo de referência síncrono

A tensão de fase no domínio do tempo é transformada para sua representação vetorial  $\vec{v}_a = \vec{v}_{qa} - j \cdot \vec{v}_{da}$ , onde os componentes do vetor são suas projeções sobre o eixo ortogonal

“qd”, conforme **Fig. A.2**. O eixo “qd” gira em rotação síncrona com a tensão de fase fundamental e  $\theta = \omega t$ .

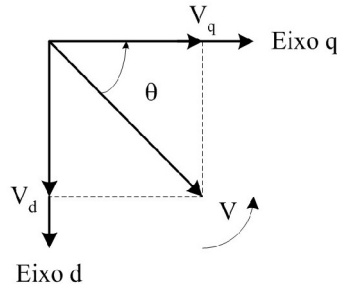


Fig. A.2: Eixos qd em rotação síncrona

O processo de transformação das grandezas no domínio do tempo para o eixo de referencia síncrono modificado (heterodyning), com a obtenção de sinais em função de  $\sin(\phi)$  ou  $\cos(\phi)$  mais uma componente de 2º harmônico, consiste da multiplicação das tensões de cada fase por  $-2 \cdot \cos(\theta)$  e  $2 \cdot \sin(\theta)$ . Utilizando-se as relações trigonométricas, as componentes do vetor  $v_a(t)$  pode ser simplificadas conforme demonstrado em (30).

$$\begin{aligned} V_{qa} &= |V_a| \cdot [\cos(\phi_a) + \cos(\phi_a + 2 \cdot \theta)] \\ V_{da} &= -|V_a| \cdot [\sin(\phi_a) + \sin(\phi_a + 2 \cdot \theta)] \end{aligned} \quad (30)$$

A filtragem do sinal de 2º harmônico deixa apenas uma quantidade CC, com as funções  $\sin(\phi)$  e  $\cos(\phi)$  representando a projeção dos vetores da tensão de cada fase sobre o eixo qd. A relação de transformação  $T_\theta$  da **Fig. A.1** é, assim, descrita em (31).

$$\begin{bmatrix} V_{qa} \\ V_{da} \\ V_{qb} \\ V_{db} \\ V_{qc} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cdot \sin(\theta) & 0 & 0 \\ -2 \cdot \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cdot \sin(\theta) & 0 \\ 0 & -2 \cdot \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cdot \sin(\theta) \\ 0 & 0 & -2 \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (31)$$

Na seqüência, as componentes de seqüência positiva, negativa e zero das tensões são obtidas a partir das tensões qd com a utilização da definição dada em (32), onde

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ é o vetor complexo de defasamento angular.}$$

$$\begin{aligned}
V^+ &= \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \\
V^- &= \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) \\
V^0 &= \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c)
\end{aligned} \tag{32}$$

Aplicando-se a representação dada para as componentes de seqüência no eixo de referência “qd”:  $V^+ = V_q^+ - j \cdot V_d^+$  e substituindo em (32), tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_q^+ \\ V_d^+ \\ V_q^- \\ V_d^- \\ V_q^0 \\ V_d^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ \\ T^- \\ T^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{qa} \\ V_{da} \\ V_{qb} \\ V_{db} \\ V_{qc} \\ V_{dc} \end{bmatrix} \tag{33}$$

Onde,  $T^+$ ,  $T^-$  e  $T^0$  são as transformações das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente, definidas como em (34), (35) e (36).

$$T^+ = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{6} & \frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{6} \\ 0 & -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{6} & \frac{1}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{6} & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \tag{34}$$

$$T^- = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{\sqrt{3}}{6} \\ 0 & -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{6} & \frac{1}{6} & \frac{\sqrt{3}}{6} & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \tag{35}$$

$$T^0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \tag{36}$$

Com esta representação, as componentes de seqüência podem ser facilmente manipuladas dentro do algoritmo do controlador. A transformação para retorno às quantidades de fase é  $V_{qd}^{abc} = T^{-1} \cdot V_{qd}^{+, -, 0}$ , com  $T^I$  dado por (37).

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (37)$$



# ANEXO A

## S-FUNCTIONs DO CONTROLE DO STATCOM

### 1) LASS01d

```
function[y,x0]=lass01(t,x,u,flag);
```

```
% Transformacao das grandezas do dominio do tempo para o eixo de referencia sincrono.
```

```
% Entradas:      1)Fa    2)Fb    3)Fc    4) Tetae
```

```
% Saidas:        1)Fqa    2)Fda    3)Fqb    4)Fdb    5)Fqc    6)Fdc
```

```
% Matriz de Transformacao Tteta do Apendice A do artigo "STATCOM Controls for Operation with  
Unbalanced
```

```
% Voltages", Clark Hochgraf & Robert H. Lasseter, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No.2, April 1998
```

```
if flag == 1 % Equacoes de Estados
```

```
% x(1) = tetae
```

```
% y(1) = u(4);
```

```
% y(1) = d(tetae)/dt
```

```
elseif flag == 3 % Equacoes de Saida
```

```
cos2 = -2*cos(u(4));
```

```
sen2 = 2*sin(u(4));
```

```
k = [ sen2  0    0  
      cos2  0    0  
      0    sen2  0  
      0    cos2  0  
      0    0    sen2  
      0    0    cos2  ];
```

```
a = [ u(1)  
      u(2)  
      u(3)  ];
```

```
y = k*a; % Vetor de saida
```

```
elseif flag == 0 % Dimensoes dos parametros do sistema
```

```
y = [0,0,6,4,0,1]; % [N.eqs estado, N. estados discretos, N. saidas, N. entradas, N. raizes
```

```
% descontinuas, flag/ caminhos diretos]
```

```
x0=[]; %condicoes iniciais
```

```
else
```

```
y=[];
```

```
end
```

## 2) LASS02d

```

function[y,x0]=lass01(t,x,u,flag);
% Separacao das grandezas no eixo de referencia sincrono em componentes simetricas
% Entradas:      1) Fqa      2) Fda      3) Fqb      4) Fdb      5) Fqc      6) Fdc
% Saidas:        1) |Fqd+|   2) Fi+      3) |Fqd-|   4) Fi-      5) |Fqd0|   6) Fi0
% Matriz de Transformacao T120 do Apendice A do artigo "STATCOM Controls for Operation with
Unbalanced
% Voltages", Clark Hochgraf & Robert H. Lasseter, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No.2, April 1998

a = -0.5 + i*sqrt(3)/2;
M = [1/3      (1/3)*a      (1/3)*a^2
      1/3      (1/3)*a^2    (1/3)*a
      1/3      1/3         1/3];

if flag == 1                                % Equacoes de Estados

elseif flag == 3                             % Equacoes de Saida
    Va = u(1)-i*u(2);
    Vb = u(3)-i*u(4);
    Vc = u(5)-i*u(6);
    Vx = [Va
          Vb
          Vc];
    T = M*Vx;

    y = [abs(T(1,:)); angle(T(1,:));
          abs(T(2,:)); angle(T(2,:));
          abs(T(3,:)); angle(T(3,:))];      % Vetor de saida

elseif flag == 0                             %Dimensoes dos parametros do sistema
    y=[0,0,6,6,0,1];                       %[N.eqs estado, N. estados discretos, N. saidas,
% N. entradas, N. raizes descontinuas, flag/
% caminhos diretos]
    x0=[];                                  % condicoes iniciais
else
    y=[];
end

```

## 3) LASS07a

```

function[y,x0]=lass01(t,x,u,flag);
% Transformacao das componentes simetricas em grandezas no eixo de referencia abc
% Entradas:      7) Tetae 6) Fi0   5) |Vc0| 4) Fi-   3) |Vc-| 2) Fi+   1) |Vc+|
% Saidas:       1) Va   2) Vb   3) Vc
% "STATCOM Controls for Operation with Unbalanced Voltages", Clark Hochgraf & Robert H. Lasseter, IEEE
% Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No.2, April 1998

if flag == 1                                %Equacoes de Estados

elseif flag == 3                            % Equacoes de Saida
    op = 2*pi/3;

    Vs1 = u(1);
    Te1 = u(2)+u(7);
    Va1 = Vs1*sin(Te1);                    % Componente de Sequencia Positiva - ABC
    Vb1 = Vs1*sin(Te1-op);
    Vc1 = Vs1*sin(Te1+op);

    Vs2 = u(3);
    Te2 = (u(4)+u(7));
    Va2 = Vs2*sin(Te2);                    % Componente de Sequencia Negativa - ACB
    Vb2 = Vs2*sin(Te2+op);
    Vc2 = Vs2*sin(Te2-op);

    Va0 = u(5)*sin(u(6)+u(7));             % Componente de Sequencia Zero - ABC
    Vb0 = Va0;
    Vc0 = Va0;

    Va = Va1 + Va2 + Va0;
    Vb = Vb1 + Vb2 + Vb0;
    Vc = Vc1 + Vc2 + Vc0;

    y =   [Va
           Vb
           Vc];                            % Vetor de saida

elseif flag == 0                            % Dimensoes dos parametros do sistema
    y = [0,0,3,7,0,1];                    % [N.eqs estado, N. estados discretos, N. saidas, N. entradas,
                                           % N. raizes descontínuas, flag/ caminhos diretos]
    x0 = [];                               % condicoes iniciais

else
    y = [];

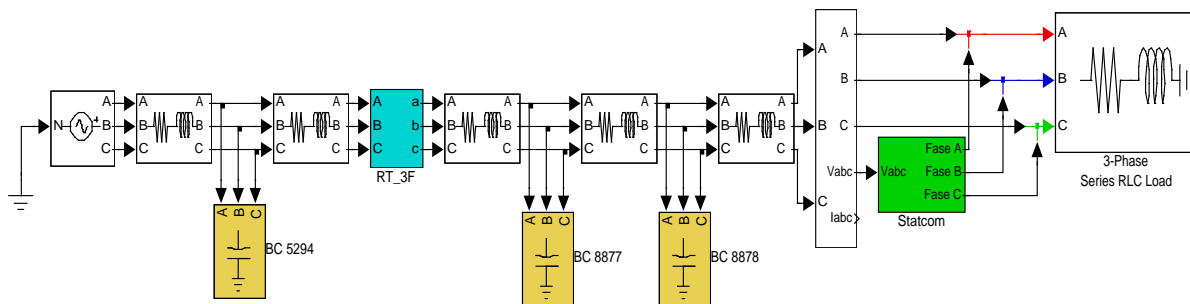
end

```

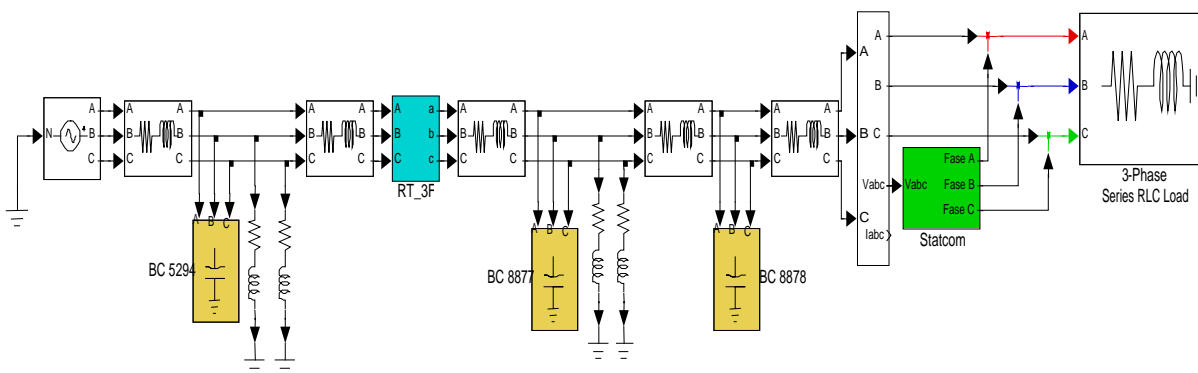
## ANEXO B

### MÓDULOS DO SIMULINK

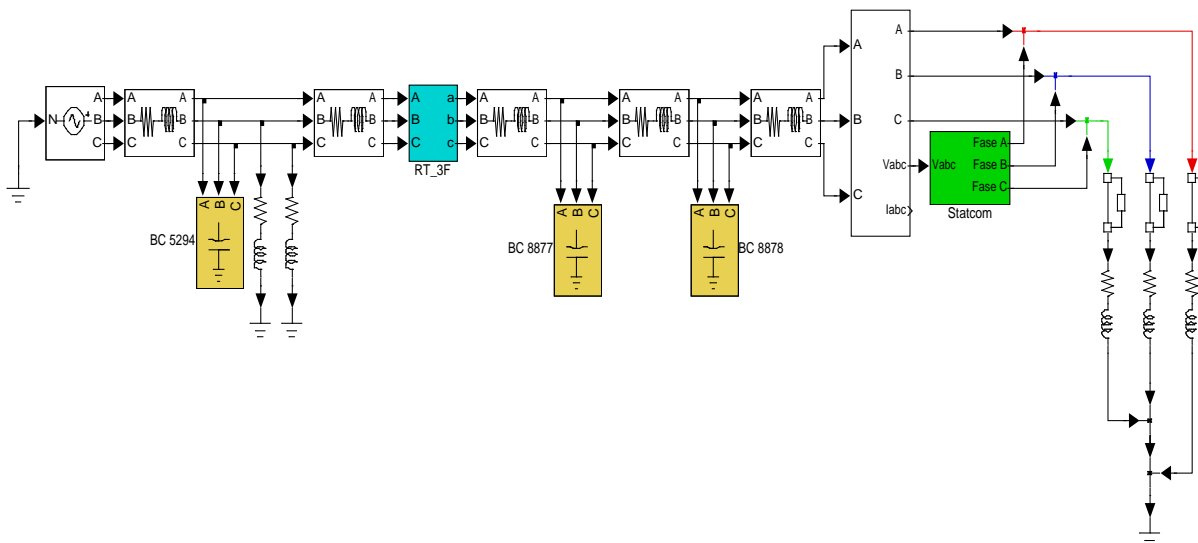
#### 1) CENÁRIO: CARGA EQUILIBRADA E REDE EQUILIBRADA



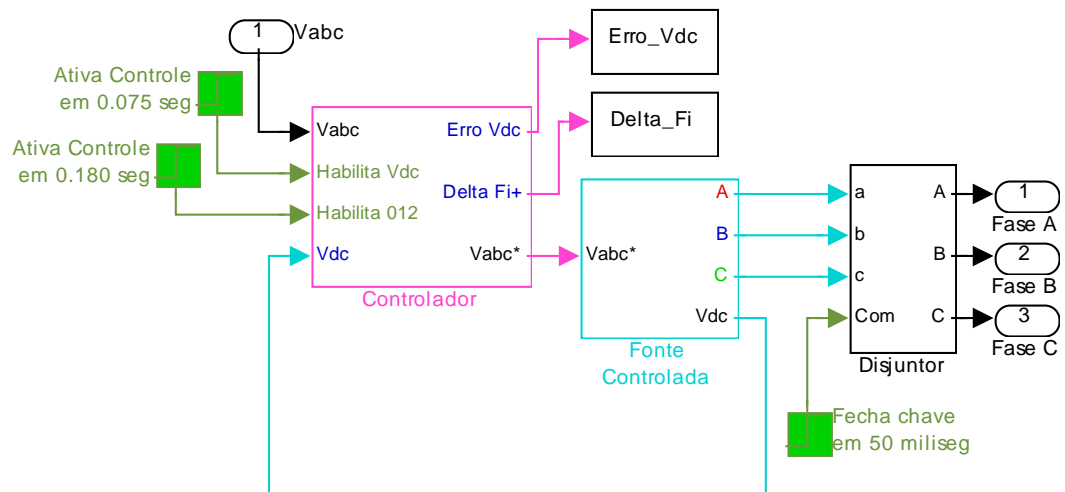
#### 2) CENÁRIO: CARGA EQUILIBRADA E REDE DESEQUILIBRADA



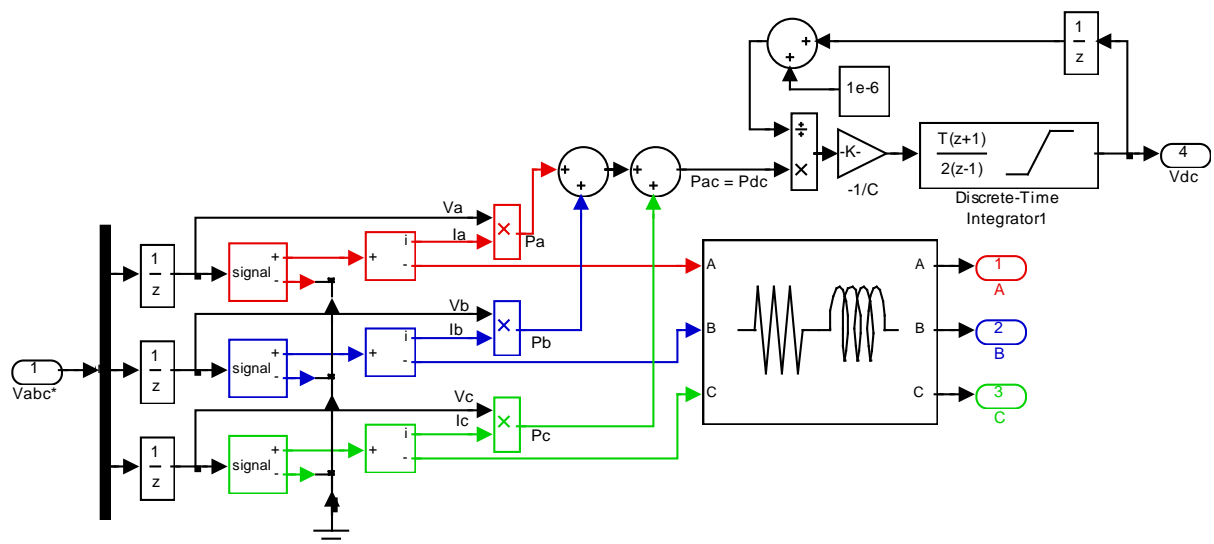
#### 3) CENÁRIO: CARGA E REDE DESEQUILIBRADAS



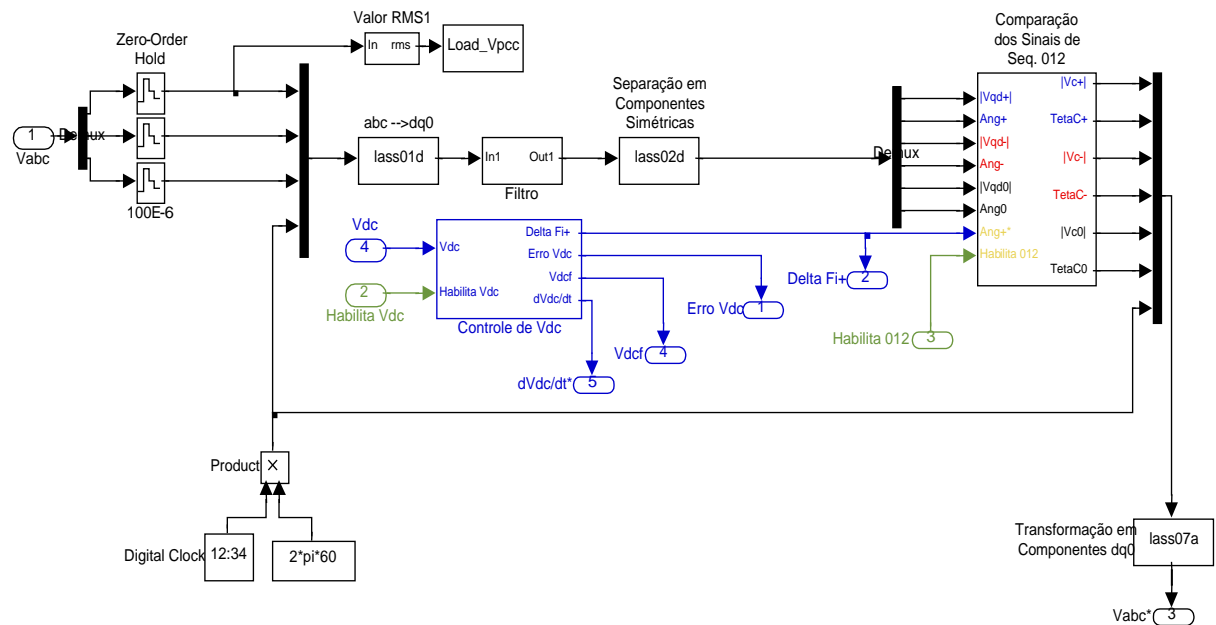
#### 4) MÓDULO DO STATCOM



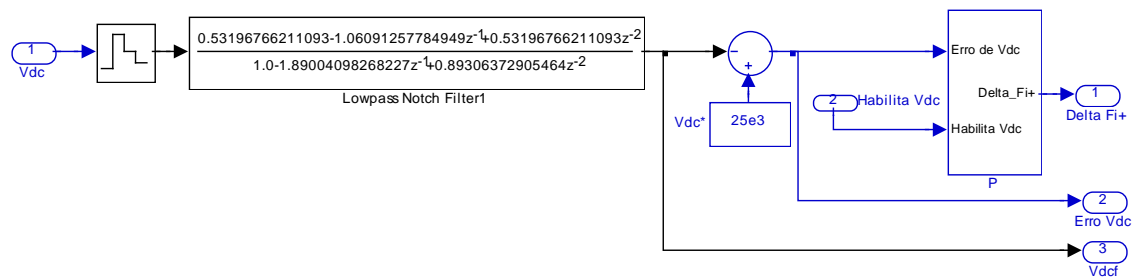
#### 5) MÓDULO DA FONTE DE TENSÃO CONTROLADA (INVERSOR)



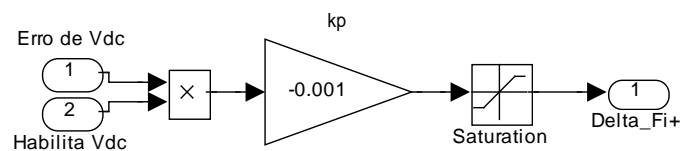
## 6) MÓDULO DE CONTROLE DO STATCOM



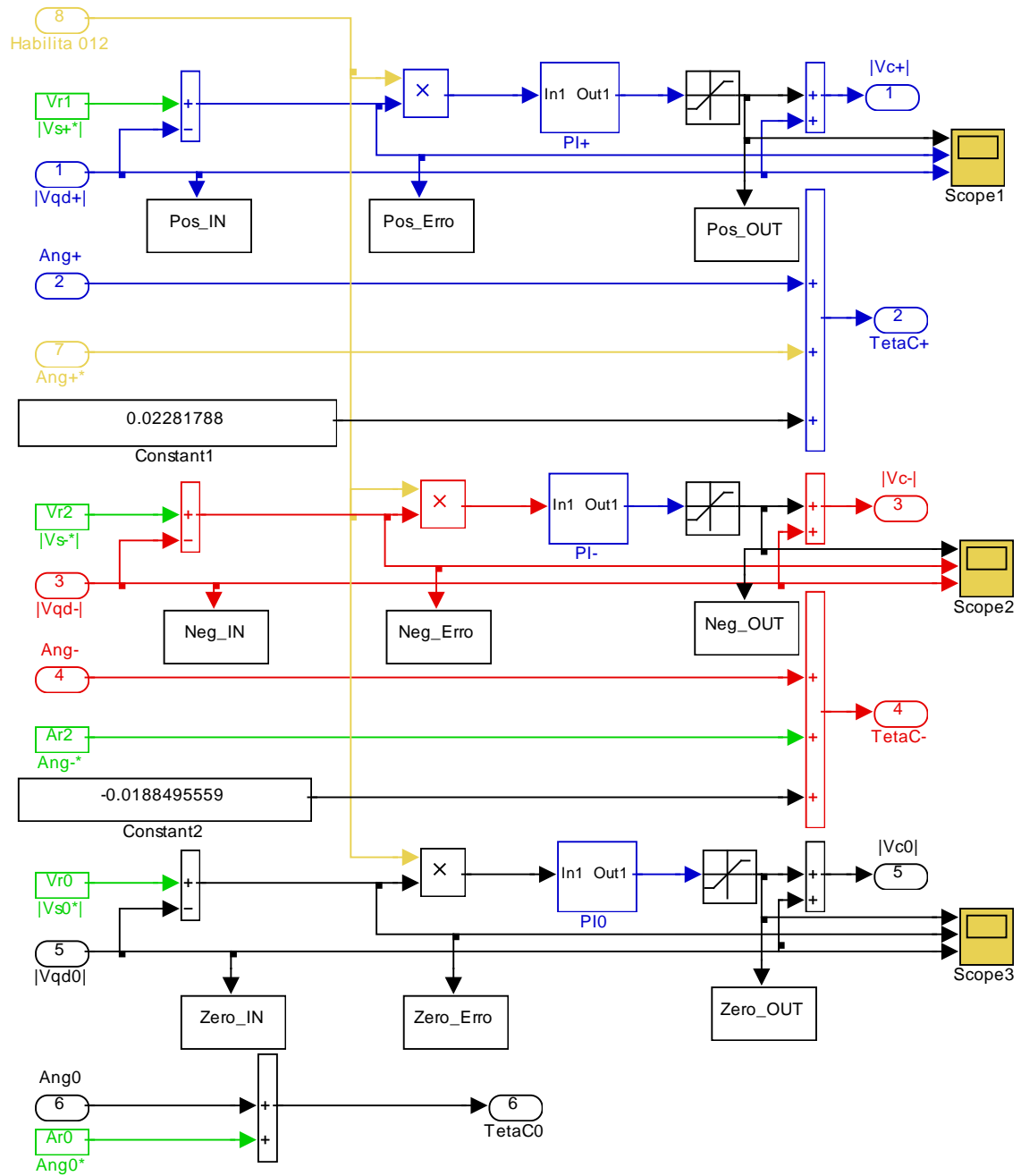
## 7) MODULO DE CONTROLE DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA



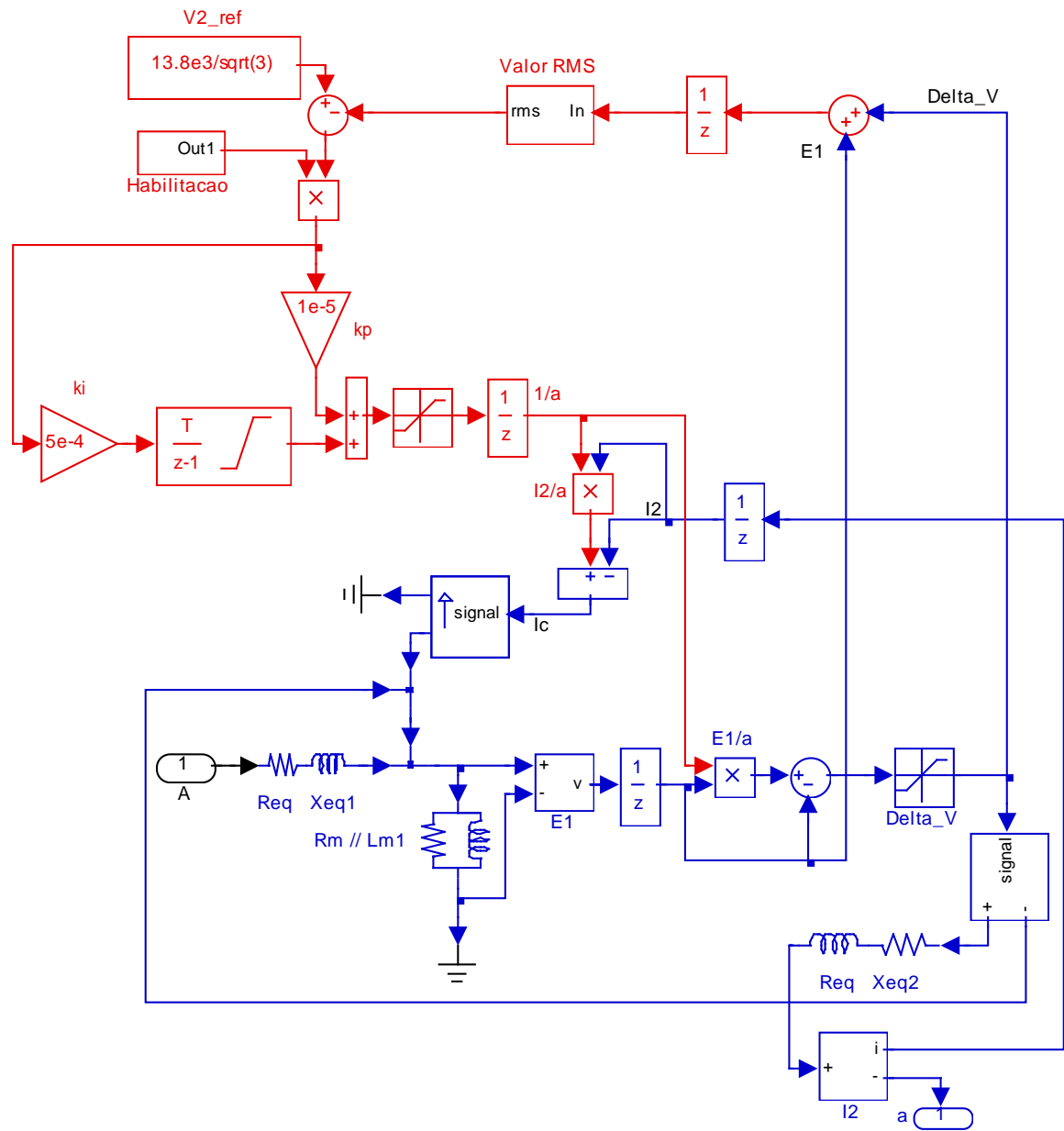
### Controlador Proporcional



## 8) MÓDULO DE COMPARAÇÃO DOS SINAIS DE SEQUÊNCIA 012



# 9) MODELO DO REGULADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO





This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.